



**Joana Teixeira**      **Simulação de sistemas solares passivos usando**  
**Sousa**                **materiais de mudança de fase (PCMs)**





**Joana Teixeira  
Sousa**

**Simulação de sistemas solares passivos usando  
materiais de mudança de fase (PCMs)**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.



Aos meus pais e à minha irmã.



## **O júri**

Presidente

**Professora Doutora Teresa Filomena Vieira Nunes**

Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**

Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Orientador

**Professor Doutor António José Barbosa Samagaio**

Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Começo por agradecer ao meu orientador o Professor Doutor António Samagaio, pela orientação, encorajamento e sugestões essenciais para a realização desta dissertação.

À Universidade de Aveiro por me acolher na fase mais importante da minha vida, pelo ótimo ambiente existente na instituição, fazendo com que leve não só a universidade mas também a cidade de Aveiro no coração.

Ao Departamento de Ambiente de Ordenamento e a todos os seus docentes e funcionários pela competência, simpatia e disponibilidade demonstradas ao longo destes anos.

Aos meus amigos, pela amizade e por todo o apoio demonstrados, foram essenciais não só no meu percurso académico, mas também na pessoa que sou hoje.

Um agradecimento especial à minha família. Aos meus pais pela educação e amor dados e por me terem proporcionado sempre as melhores condições possíveis e à minha irmã pelo carinho, amizade e união.

A todos muito obrigada!



**Palavras-chave**

Material de mudança de fase, calor latente, calor específico, armazenamento térmico, simulação numérica, estudo paramétrico.

**Resumo**

O gradual consumo de energia primária a nível mundial deu origem a uma crise não só ambiental como também económica, proveniente das limitações das reservas energéticas e do fornecimento. Estas inquietações têm levado a um estudo cada vez mais aprofundado no que concerne à eficiência energética de edifícios. É neste contexto que surge o estudo da aplicação dos materiais de mudança de fase (PCM) na térmica dos edifícios.

O presente trabalho consiste no estudo da influência da introdução de materiais de mudança de fase no comportamento térmico de um edifício. Foi analisada uma simulação numérica para um sistema solar passivo de ganho direto, por um programa de simulação designado EXTEND™. Efetuou-se, também, o estudo paramétrico de determinadas propriedades associadas aos materiais de mudança de fase. Após a análise, foi testado o impacto, em termos de conforto, da utilização de materiais de mudança de fase em sistemas solares passivos de ganho direto.



**Keywords**

Phase change materials, latent heat, specific heat, thermal storage, numerical simulation, parametric study

**Abstract**

The gradual consumption of primary energy worldwide has led to a crisis not only environmentally but also economically due to limitations of energetic reserves and supply. These concerns have led to an increasingly in-depth study regarding the energetic efficiency of buildings. In this context, the study of application of the phase change material (PCM) in the temperature of buildings comes up.

This paper consists of the study of the influence of the introduction of phase change materials in the thermal behavior of a building. A numerical simulation for a direct gain passive solar system was analyzed in a program called EXTEND <sup>TM</sup>. There was also a parametrical study made on certain properties associated with the phase change material. After the analysis, the impact was tested in terms of comfort of the use of phase change materials in direct gain passive solar systems.



# Índice

Índice de Figuras .....	xv
Índice de Tabelas .....	xvii
Lista de abreviaturas .....	xix
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Apresentação do conteúdo da tese .....	4
2. Sistemas solares passivos .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Edifícios bioclimáticos.....	7
2.3 Sistemas solares passivos.....	9
2.3.1 Sistema solar passivo de ganho direto .....	10
2.3.2 Sistema solar passivo de ganho indireto .....	11
2.3.2.1 Parede de Trombe.....	12
2.3.3 Sistema solar passivo de ganho isolado .....	13
2.4 Materiais de mudança de fase .....	14
2.4.1 Propriedades .....	15
2.4.2 Classificação .....	17
2.4.2.1 PCM Orgânicos .....	19
2.4.2.2 PCM Inorgânicos.....	20
2.4.2.3 Misturas eutécticas .....	20
2.4.3 Incorporação de PCM em soluções construtivas .....	21
2.4.3.1 Microencapsulamento.....	21
2.4.3.2 Macroencapsulamento.....	22
2.4.3.3 Imersão e incorporação directa.....	22
2.5 Materiais e componentes da construção com PCM .....	23
2.5.1 Painéis de gesso cartonado.....	23
2.5.2 Elementos à base de betão.....	25
2.5.3 Dispositivos de sombreamento de envidraçados.....	25
2.5.4 Pavimentos radiantes.....	26
2.5.5 Tetos falsos.....	26
2.5.6 Painéis de isolamento térmico.....	27
2.6 Transferência de calor .....	27
2.6.1 Condução.....	27
2.6.2 Convecção .....	29
2.6.3 Radiação .....	30
2.7 Problemática de transferência de calor em PCM .....	31
3. Metodologia de análise.....	33
3.1 Modelação de sistemas solares passivos .....	33

3.1.1 Metodologia de Drolen .....	33
3.1.2 Metodologia de Kosar .....	38
3.2 Simulação numérica (EXTEND™) .....	38
3.3 Abordagem.....	40
3.3.1 Valores utilizados no balanço energético.....	40
3.3.2 Determinação da espessura dos materiais .....	41
3.3.3 Determinação do valor do calor específico .....	43
3.3.4 Resistência e armazenamento térmico .....	46
4. Resultados e análise.....	49
4.1 Solução analítica do balanço energético .....	49
4.2 Simulação numérica do balanço energético .....	52
4.3 Valores da espessura dos materiais .....	58
4.4 Valores do calor específico .....	59
4.5 Valores da resistência e armazenamento térmico .....	60
5. Conclusões.....	63
Bibliografia.....	65



## Índice de Figuras

Figura 1 – Consumo de energia final por sector, em 2011 (adaptado de (DGEG, 2013)). ...	1
Figura 2 – Componentes de um sistema solar passivo (adaptado de (Holtz et al., 1989))....	9
Figura 3 – Várias vistas do Edifício Solar XXI (adaptado de (Gonçalves e Cabrito, 2005)). .....	10
Figura 4 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho direto (adaptado de (Holtz et al., 1989)). .....	11
Figura 5 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho indireto (adaptado de (Holtz et al., 1989))......	12
Figura 6 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho isolado (adaptado de (Holtz et al., 1989)). .....	14
Figura 7 - Comportamento dos PCM em termos de calor sensível e latente armazenado (adaptado de (Gu et al., 2008)). .....	15
Figura 8 – Classificação dos PCM em diferentes categorias (adaptado de (Zalba et al., 2003)). .....	18
Figura 9 - Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão (adaptado de (Dieckmann, 2012))......	19
Figura 10 - Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM - ThermalCORE™ National Gypsum (adaptado de (Micronal ® PCM Gypsum Wallboards Phase Change)). .....	22
Figura 11 - Condução de calor através de um sólido (adaptado de (Azenha, 2004))......	28
Figura 12 – Esquema de um sistema de ganho direto (adaptado de (Drolen, 1979))......	33
Figura 13 – Esquema de uma resistência térmica para um modelo de ganho direto simples. .....	36
Figura 14 – Comparação da espessura entre o PCM e os outros materiais de construção (Dieckmann, 2012). .....	43
Figura 15 - Variação do calor específico do compósito de PCM (Kuznik e Virgone, 2009). .....	44
Figura 16 - Evolução do calor específico em função da temperatura e calor específico médio (adaptado de (Kuznik e Virgone, 2009)). .....	45
Figura 17 - Variação da entalpia em função da temperatura do compósito de PCM testado (adaptado de (Kuznik e Virgone, 2009)). .....	45
Figura 18 – Representação esquemática de uma parede de Trombe com PCM decomposta segundo as capacidades térmicas e as resistências (Samagaio, comunicação pessoal, adaptado de (Kosar, 1981)). .....	46
Figura 19 – Temperatura como uma função do tempo para um modelo de ganho direto...	49
Figura 20 – Variação da insolação em função do tempo.....	50
Figura 21 – Variação sinusoidal da temperatura em função do tempo. ....	51
Figura 22 - Esquema do primeiro modelo de simulação numérica no programa EXTEND™. .....	52
Figura 23 - Temperatura em função do tempo para um modelo de ganho direto. ....	53

Figura 24 - Esquema do segundo modelo de simulação numérico no programa EXTEND™.	54
Figura 25 - Variação sinusoidal da temperatura interior e variação da insolação em função do tempo.	54
Figura 26 - Esquema do terceiro modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.	55
Figura 27 - Variação sinusoidal da temperatura interior em função do tempo e variação da insolação e da temperatura exterior em função do tempo.	56
Figura 28 - Esquema do quarto modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.	57
Figura 29 - Variação sinusoidal da temperatura interior, variação da insolação e variação da temperatura exterior, com aplicação de materiais de mudança de fase.	57
Figura 30 – Variação da espessura do material de alvenaria e variação da espessura total da parede em função da espessura do material de mudança de fase.	58
Figura 31 – Variação do calor específico, calor específico médio para o intervalo 9 °C ÷ 32 °C e calor específico médio para diferentes intervalos de temperatura.	59

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos materiais de mudança de fase para aplicação em edifícios (adaptado de (Zalba et al., 2003). .....	17
Tabela 2 - Parâmetros associados ao sistema de ganho direto. ....	34
Tabela 3 – Valores paramétricos indicados por D. R. Kosar para o estudo de sistemas solares passivos (Kosar, 1981). ....	38
Tabela 4 - Principais componentes utilizados no EXTEND™. ....	40
Tabela 5 - Inputs e Outputs do EXTEND™.....	40
Tabela 6 – Valores assumidos para a resolução das equações. ....	41
Tabela 7 - Valores obtidos na resolução das equações mencionadas.....	41
Tabela 8 - Características dos PCM orgânicos (Vaz, 2012).....	44
Tabela 9 - Tabela síntese das propriedades dos materiais constituintes da parede de Trombe. ....	46
Tabela 10 – Valores das variáveis introduzidas no primeiro modelo de simulação.....	52
Tabela 11 – Intervalos de temperatura e, respetivos, valores do armazenamento térmico. ....	60
Tabela 12 – Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe.....	61
Tabela 13 - Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe para o caso nº1. ....	61
Tabela 14 - Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe para o caso nº2. ....	62
Tabela 15 - Valores da espessura e do armazenamento térmico para os diferentes casos de estudo.....	62



## Lista de abreviaturas

DGEG	<u>D</u> ireção <u>G</u> eral de <u>E</u> nergia e <u>G</u> eologia
RCCTE	<u>R</u> egulamento das <u>C</u> araterísticas de <u>C</u> omportamento <u>T</u> érmico dos <u>E</u> difícios
SCE	<u>S</u> istema de <u>C</u> ertificação <u>E</u> nergética dos <u>E</u> difícios
REH	<u>R</u> egulamento do <u>D</u> esempenho <u>E</u> nergético dos <u>E</u> difícios de <u>H</u> abitação
RECS	<u>R</u> egulamento do <u>D</u> esempenho <u>E</u> nergético dos <u>E</u> difícios de <u>C</u> omércio e <u>S</u> erviços
<i>PCM</i>	<i><u>P</u>hase <u>C</u>hange <u>M</u>aterials</i> (Materiais de Mudança de Fase)
PVC	<i><u>P</u>oly<u>v</u>inyl <u>C</u>hloride</i> (Policloreto de Vinil)
<i>DSC</i>	<i><u>D</u>ifferential <u>S</u>canning <u>C</u>alorimetry</i> (Calorimetria Diferencial de Varrimento)
<i>XPS</i>	<i><u>E</u>xtruded <u>P</u>oly<u>s</u>tyrene</i> ( <i>Poliestireno Extrudido</i> )

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

Hoje em dia, a energia e o ambiente são as duas principais questões enfrentadas pela sociedade. O desenfreado desenvolvimento tecnológico das últimas décadas juntamente com o desenvolvimento populacional têm resultado num elevado aumento no consumo de energia, com uma taxa crescente anual de 2,3%. A produção de energia resulta, maioritariamente, em cerca de 80% do uso de combustíveis fósseis aos quais estão associadas as emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo significativamente para as alterações climática (Zalba et al., 2003). No que diz respeito ao consumo global por parte dos edifícios, este tem vindo a atingir valores entre 20% e 40% nos países desenvolvidos, superando o sector da indústria e dos transportes. Este cenário resulta do notório crescimento da população mundial supramencionado, do crescimento do sector dos serviços e da exigência quanto aos níveis de conforto. De acordo com o Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de abril, as condições ambientais de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20 °C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25 °C para a estação de arrefecimento (RCCTE, 2006). Por conseguinte, a eficiência energética dos edifícios captou grande importância, tornando-se, atualmente, um dos principais objetivos das políticas energéticas a nível mundial (L. Pérez-Lombard e J. Ortiz, 2008).

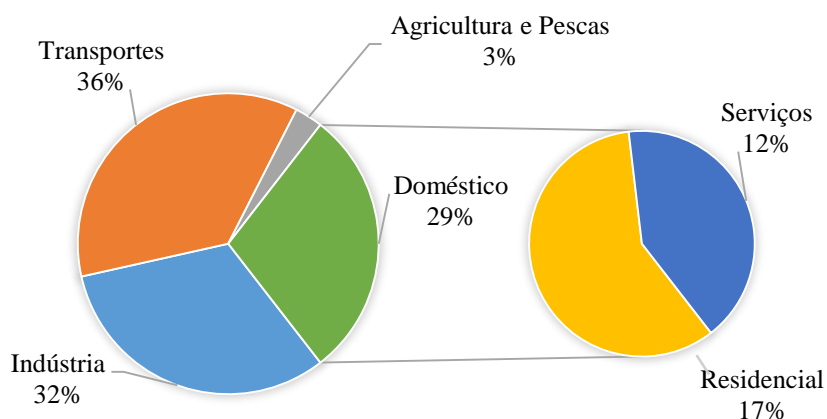


Figura 1 – Consumo de energia final por sector, em 2011 (adaptado de (DGEG, 2013)).

A nível europeu, no âmbito do desempenho energético dos edifícios, foi apresentada a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002 (J. Ofic. da CE, 2002). A respetiva diretiva foi transposta para o ordenamento jurídico nacional através do Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de abril, o qual aprovou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, do Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, que consentiu o Sistema Nacional de Certificação Energética de Climatização em Edifícios, e do Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril, que aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, RCCTE. Neste contexto, o Estado promoveu, com forte dinamismo, a eficiência energética dos edifícios e adquiriu uma experiência relevante, que se traduziu não só na eficácia do sistema de certificação energética, mas também no diagnóstico dos aspetos cuja aplicação prática se revelou suscetível de melhoria. O regime estabelecido pela Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, foi reformulado pela publicação da Diretiva n.º 2010/31/EU, de 19 de maio de 2010, a qual tenciona clarificar alguns dos princípios do texto inicial e apresentar novas disposições que visam o reforço do plano de promoção do desempenho energético nos edifícios, à luz das metas e dos desafios acordados pelos Estados-Membros para 2020. A adaptação para o direito nacional da Diretiva n.º 2010/31/EU, de 19 de maio de 2010, gerou a oportunidade de melhorar a sistematização e o âmbito de aplicação do sistema de certificação energética e respetivos regulamentos, bem como de alinhar os requisitos nacionais às imposições explicitamente decorrentes da mesma. No final de 2013, a diretiva em questão foi transposta para o direito nacional dando origem ao Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, cujo visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através das seguintes “ferramentas”:

- Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE),
- Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e,
- Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

A definição de requisitos e avaliação de desempenho energético dos edifícios passa a basear-se nos seguintes tópicos: no caso de edifícios de habitação, o comportamento térmico e a eficiência dos sistemas que assumem posição de destaque; e no caso dos edifícios de comércio e serviços, são a instalação, a condução e a manutenção de sistemas técnicos que

adotam uma posição fulcral. Relativamente à eficiência energética, mantém-se a divulgação do uso de fontes de energia renovável, com clarificação e reforço dos métodos para quantificar o respetivo contributo, e com natural destaque para o aproveitamento do recurso solar. Para além disso, é incentivado o uso de sistemas ou soluções passivas nos edifícios, bem como a otimização do desempenho energético em consequência de menor recurso aos sistemas ativos de climatização. É neste contexto que surge o conceito de edifício com necessidades de energia quase nulas, o qual passará a constituir um padrão para futuras construções a partir de 2020, ou de 2018, no caso dos edifícios novos de entidades públicas, bem como uma referência para as grandes intervenções no edificado existente. Este modelo conjuga a redução das necessidades energéticas do edifício com o abastecimento energético, recorrendo ao uso de energia de origem renovável.

Tendo em conta o recurso a fontes de energia renovável, torna-se necessário o desenvolvimento de dispositivos de armazenamento dessa mesma energia. O armazenamento da energia térmica tanto pode ser feito através do armazenamento de calor sensível (aumento da temperatura de um material) ou de calor latente (mudança de fase de um material) (Sharma et al., 2009). Contudo, estes processos apresentam desvantagens. O armazenamento de calor sensível depende do seu volume e resulta numa maior variação de temperatura, enquanto o armazenamento de calor latente possui elevada densidade de armazenamento associada a uma menor variação de temperatura. Os materiais que possuem características para o armazenamento de calor latente são designados por materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials - PCM*), sendo capazes de absorver uma grande quantidade de energia durante a sua fusão e libertá-la durante a solidificação.

Os materiais de mudança de fase são considerados como uma possível solução para reduzir o consumo de energia dos edifícios. A combinação deste material com os tradicionais materiais de construção possibilita a estabilização da temperatura interior através do calor latente armazenado pelos PCM. Ao armazenar energia térmica dentro de uma determinada gama de temperatura, a inércia do edifício aumenta e estabiliza a temperatura interior. A aplicação destes materiais tem como finalidade a redução das necessidades de aquecimento ou arrefecimento, remetendo para uma poupança de energia por parte dos sistemas de climatização.



## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é o de verificar se a incorporação de materiais de mudança de fase num dado ambiente conduz a benefícios significativos no conforto térmico dos ocupantes.

Será, então, realizada uma simulação do comportamento térmico de um sistema solar passivo usando materiais de mudança de fase. E será efetuado um estudo dos parâmetros identificados num sistema solar passivo de ganho direto.

Para alcançar o objetivo principal, este trabalho pode ser definido em objetivos secundários seguidamente descritos:

- Descrição do conceito e princípio de funcionamento dos sistemas solares passivos bem como dos PCM, e das várias formas de incorporação em edifícios;
- Introdução ao modelo adaptado e à ferramenta computacional que permitem realizar, de uma forma simples e coerente, uma simulação numérica do uso de PCM;
- Análise dos resultados obtidos nas simulações e obtenção das respetivas conclusões.

Em última análise este trabalho espera contribuir para reforçar a ideia de que o futuro da construção terá que passar por um uso coerente dos recursos de energia fóssil e do aproveitamento da energia solar, refletindo-se na projeção e construção de edifícios.

## **1.3 Apresentação do conteúdo da tese**

A estrutura deste trabalho assenta numa sequência lógica de etapas que vão sendo cumpridas por forma a atingir o objetivo principal, em seguida enumeradas:

- Capítulo 1 - apresentação dos objetivos do trabalho e uma breve descrição de cada capítulo;
- Capítulo 2 - bibliografia recolhida sobre os diferentes modelos de sistemas solares passivos, descrição e caracterização dos materiais de mudança de fase. Serão também explicados os vários fenómenos de transferência de calor que ocorrem entre os meios exterior e interior dos edifícios, destacando-se uma interpretação teórica dos mesmos para o caso dos materiais de mudança de fase. Por último, será feita uma descrição das várias formas de incorporação de PCM em materiais e elementos construtivos;

- Capítulo 3 - apresentação das características do modelo de simulação, definição dos pressupostos, considerações gerais e exposição detalhada do tipo de abordagem adotado;
- Capítulo 4 - apresentação e discussão dos resultados;
- Capítulo 5 - principais conclusões da dissertação, sendo também indicadas algumas sugestões de trabalho futuro.



## **2. Sistemas solares passivos**

### **2.1 Introdução**

A necessidade do desenvolvimento de estruturas capazes de proteger o Homem das variações climáticas surgiu por volta de 7000 e 4000 anos A.C.. Desde essa altura que toda a história da engenharia revela o esforço incessante da raça humana para desenvolver projetos de construção adequados à melhoria do conforto térmico. Os edifícios tradicionais foram construídos tendo em conta as condições climáticas de forma a manter os espaços com um clima ameno (Telkes, 1983). No entanto, estes métodos foram desvalorizados com o início da prática da arquitetura contemporânea a, a qual se baseia no uso de métodos mecânicos para aquecimento e/ou arrefecimento, contribuindo para o estímulo de elevados gastos energéticos. Perante este cenário e tendo como finalidade a conceção de estruturas que contribuam de forma eficiente para o conforto térmico, surge o conceito de edifício solar passivo dando ênfase às componentes de armazenamento térmico.

O armazenamento de energia térmica pode ser realizado tanto por armazenamento na forma de calor sensível como armazenamento na forma de calor latente. Este último modelo de armazenamento, que utiliza sistemas solares passivos, ocorre devido ao uso de materiais de mudança de fase, dado que apresentam uma elevada capacidade de armazenamento de energia térmica.

Neste capítulo serão introduzidos os conceitos físicos mais relevantes associados aos materiais de mudança de fase, assim como, serão enumerados os seus vários tipos, propriedades e, por fim, formas de aplicação à construção.

### **2.2 Edifícios bioclimáticos**

De acordo com dados estatísticos, a atividade humana que se faz sentir nos países, maioritariamente, industrializados é responsável pela emissão de cerca de 4,5 de 6 mil milhões de toneladas de carbono emitido a nível mundial, constatando-se que metade destas emissões são provenientes por parte dos edifícios. Em prol desta situação, deu-se especial destaque à valorização de construções a nível energético. E verificou-se que as emissões de carbono podem ser reduzidas para 60% ou mais, o que se traduz numa diminuição de 1,35 biliões de toneladas de carbono (Gonçalves, 2004).

Em 1953, os irmãos Olgyay<sup>1</sup> inseriram, na sua literatura, o termo “arquitetura bioclimática” (Kuznik, Virgone, e Noel, 2008). Esta abordagem refere-se a um modo alternativo de construção de edifícios, assegurando que são tidas em conta as condições climáticas dos locais e que são implementadas tecnologias solares passivas. As tecnologias mencionadas concentram-se no maior aproveitamento de energia solar. De acordo com dados literários, uma percentagem de 13% de energia primária é consumida pelos edifícios podendo, através deste novo conceito, aumentar para 50% ou até mesmo 57% (Fernández- González, 2007). A quantidade total de recursos energéticos despendida por um edifício inclui a energia utilizada ao longo da criação do projeto do edifício, construção e a energia requerida *a posteriori*, isto é, energia necessária para manter o conforto térmico do edifício. Neste sentido, os edifícios bioclimáticos foram desenvolvidos de modo a promover a eficiência energética, conforto e a iluminação natural e, para tal, abordam parâmetros como a localização e topologia do edifício (inclinação, vegetação, sol, vento, etc).

Canas e Martín (Canas e Martín, 2004) realizaram um estudo no qual pretendiam definir as bases da construção bioclimática, fundamentando-se na construção vernacular (tipo de arquitetura construtiva com técnicas regionais). As características apresentadas por 212 edifícios pré-selecionados serviram como base para a respetiva pesquisa. Os resultados demonstraram que a localização do edifício é uma condição importante para a construção de um edifício bioclimático. No Norte de Espanha, onde predomina o clima oceânico, as estratégias de uso da radiação solar (janelas e varandas orientadas para Sul), bem como as estratégias de proteção contra a chuva (uso de grandes beirais para proteger a fachada dos edifícios e as varandas), devem ser utilizadas de acordo com a arquitetura vernacular. Na área mediterrânea, devido ao clima quente e seco, devem ser implementadas estratégias de proteção contra a radiação solar, como por exemplo, sistemas de sombreamento.

---

<sup>1</sup> Os irmãos Olgyay, responsáveis pelo surgimento da arquitetura bioclimática, Givoni e Fanger, que se tornaram clássicos dos estudos ambientais. O livro *Design with climate* foi o primeiro a desenvolver um método racional que levasse em consideração as variáveis climáticas do lugar. Por sua vez, Givoni demonstrou a inter-relação entre o homem, clima e arquitetura, destacando os elementos climáticos e as suas influências no livro *Man, dynamite and architecture*. No caso de Fanger, este dedicou-se aos estudos das zonas de conforto dentro das edificações, com a publicação *Thermal Comfort*, fornecendo contributos importantes para pesquisas futuras (Romero, 2000).

## 2.3 Sistemas solares passivos

A definição de sistema solar passivo encontra-se articulada à arquitetura bioclimática. Como já foi supramencionado, este género de edifício foi criado de forma a aumentar a eficiência energética com base no aproveitamento da radiação solar devido à sua edificação (forma, orientação, isolamento, entre outros), à qualidade dos materiais empregues (janelas, paredes, pavimentos, cobertura) e ao seu desempenho ao nível de ventilação. Quanto à construção, esta obedece a determinados critérios como: o isolamento térmico reforçado com vãos envidraçados; a eliminação de pontes térmicas; a excelente impermeabilização ao ar; a ventilação com duplo fluxo (existência de recuperador de calor); a captura ideal mas passiva de energia solar, a componente térmica vindo do solo e a limitação dos consumos de energia por parte dos equipamentos eletrodomésticos. O desempenho energético e o conforto térmico, segundo estas configurações, poderão ser estimados a partir de métodos numéricos já desenvolvidos (Balcomb e McFarland, 1978). Na Figura 2 encontram-se identificados alguns dos componentes que definem o correto funcionamento de um edifício solar passivo. O conceito assenta nos princípios de que primeiro é necessário receber o calor, transformá-lo, distribuí-lo e, de seguida, mantê-lo.

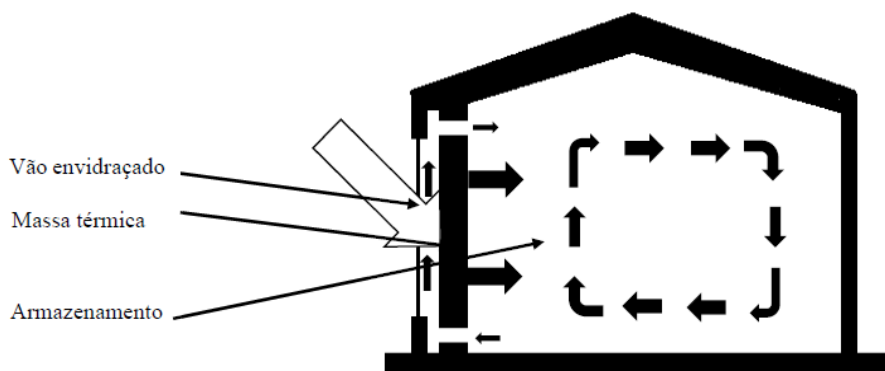


Figura 2 – Componentes de um sistema solar passivo (adaptado de (Holtz et al., 1989)).

A nível nacional, todas as particularidades pré-mencionadas sobre as estruturas solares passivas encontram-se implementadas no Edifício Solar XXI (v. Figura 3), construído pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (Gonçalves e Cabrito, 2005). A sua conceção sustentou-se na otimização térmica da envolvente, no aumento da área de captação de ganhos solares com uma fachada solar orientada a sul, servindo como um sistema de ganho direto

para o aquecimento, nos mecanismos de sombreamento exteriores, no sistema de arrefecimento passivo por tubos enterrados, na iluminação natural, entre outros.



Figura 3 – Várias vistas do Edifício Solar XXI (adaptado de (Gonçalves e Cabrito, 2005)).

A estrutura apresentada, edifício solar passivo, reúne os dispositivos essenciais que contribuem para o seu aquecimento ou arrefecimento natural. No caso dos sistemas destinados a aquecimento passivo, estes adotam três critérios que combinam os sistemas de ganho, a ligação de armazenamento e a transmissão de energia térmica (Haglund e Rathmann, 1996):

- Ganho direto;
- Ganho indireto;
- Ganho isolado.

### **2.3.1 Sistema solar passivo de ganho direto**

O sistema solar passivo de ganho direto, por ser o mais simples, é o mais utilizado, ainda que, na maior parte das vezes, de uma forma empírica e não intencional. O sistema em causa distingue-se pela absorção, armazenamento e libertação de energia que ocorrem diretamente nos espaços expostos à radiação. A disposição do edifício compreende particularidades como a área de captação da energia solar direcionada a sul, a qual permite uma captação máxima no Inverno e mínima no Verão. As paredes, lajes de teto e piso são utilizadas como forma de armazenamento de calor. As paredes e/ou janelas encontram-se orientadas para sul de modo a maximizar a captação de energia solar durante o Inverno. No Verão, o

sobreaquecimento é controlado através do uso de formas de sombreamento. No caso do calor armazenado, este é distribuído por radiação e convecção natural, normalizada pela posição da massa térmica em relação aos espaços habitáveis (Holtz et al., 1989). Quanto às perdas de calor, estas podem ser reduzidas com a aplicação de isolamento térmico eficiente dos elementos opacos, a instalação de estruturas móveis para isolamento noturno e a distribuição de zonas tampão. A aplicação de vidros duplos de baixa emissividade e/ou isolamento contribuem para minimizar essas perdas, ao longo da noite ou em dias encobertos. O material que mais se utiliza nestas situações são os estores de PVC exteriores e as portadas de madeira interiores ou exteriores.

Apesar dos esforços, o sistema apresenta elevadas flutuações da temperatura interior, provocando desconforto durante as horas de maior incidência do sol (precisamente no Inverno quando os ganhos são necessários, especialmente nas fachadas orientadas a sul) (Nayak, Bansal e Sodha, 1983). A aplicação da devida quantidade de massa de armazenamento térmico funcionará como uma solução para a prevenção do sobreaquecimento e definição da gama de temperatura ótima para o conforto humano. A Figura 4 representa a forma esquemática de um sistema solar passivo de ganho direto.

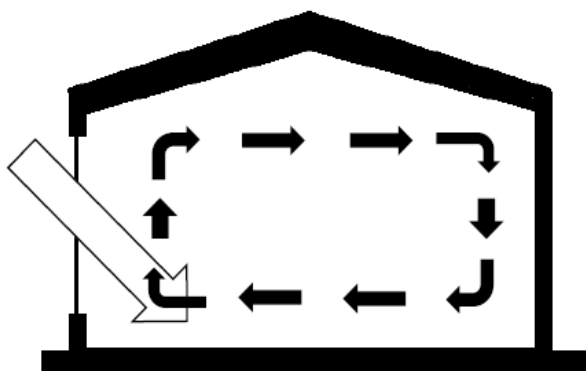


Figura 4 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho direto (adaptado de (Holtz et al., 1989)).

### **2.3.2 Sistema solar passivo de ganho indireto**

No sistema solar passivo de ganho indireto, a radiação solar incide sobre uma massa térmica que se localiza entre uma cobertura seletiva orientada a sul e o espaço a aquecer. A distância entre a estrutura envidraçada e a parede, a qual deve estar pintada de preto de forma a aumentar a taxa de absorção, deve situar-se entre 1 e 15 cm de modo a criar



um pequeno espaço de ar (Hadorn, 2004). Esta técnica, que por norma recorre ao uso de um envidraçado duplo, oferece maior capacidade de atenuar as variações da temperatura, pois não recebe diretamente a radiação solar, evitando o sobreaquecimento. Na Figura 5 está projetado o sistema de ganho indireto.

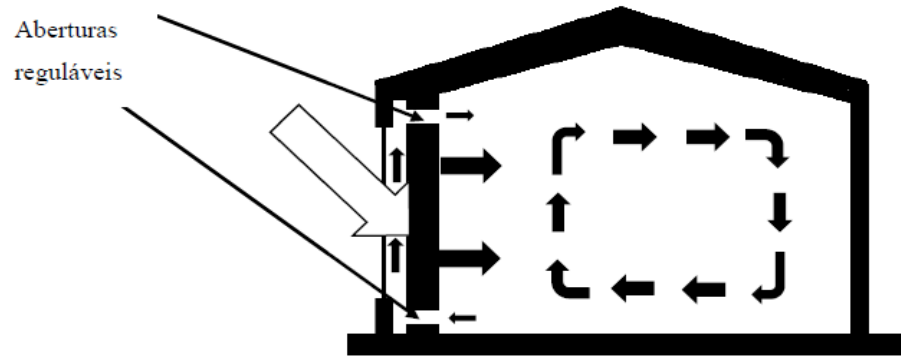


Figura 5 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho indireto (adaptado de (Holtz et al., 1989)).

Os sistemas de aquecimento de ganho indireto são classificados segundo a localização da massa térmica, e denominam-se: paredes acumuladoras (paredes de Trombe (massa na superfície lateral)), paredes e coberturas de água (massa na cobertura) e ganho separado (massa por baixo do espaço a climatizar).

### 2.3.2.1 Parede de Trombe

Edward Mars, engenheiro de nacionalidade americana, criou a clássica parede de Trombe no ano de 1881. No entanto, foram o engenheiro Felix Trombe e o arquiteto Jacque Michel, ambos de nacionalidade francesa, que a divulgaram, sendo assim conhecida por parede de Trombe (Saadatian et al., 2012). Quanto à sua localização, esta situa-se logo a seguir ao vão envidraçado deixando apenas um pequeno espaço de ar entre ambos, tal como foi já referido. As paredes de Trombe apresentam uma diversidade de classes, tais como:

- Parede acumuladora (Parede de Trombe não ventilada);
- Parede dinâmica;
- Parede de Trombe;
- Parede de água.

A parede acumuladora, caracterizada pela ausência de aberturas para permitir a circulação térmica, apresenta uma eficiência inferior a uma parede de Trombe ventilada.

Apesar de possibilitar a concentração de uma elevada temperatura entre a estrutura envidraçada e a parede, a sua transmissão para o interior vai ser reduzida.

As estruturas que contêm as paredes de Trombe apresentam orifícios situados na parte superior e inferior da parede de forma a possibilitar a circulação do ar. Assim, parte da energia que é transmitida no espaço de ar aquece, eleva-se por convecção e infiltra-se no volume a aquecer em orifícios situados na parte superior da parede. Por sua vez, o orifício situado na parte inferior da parede, próximo do solo, é responsável pela aspiração do ar fresco. A restante quantidade de energia é transmitida por condução, através da parede, e manifesta-se na sua superfície interior, depois de um desfasamento que é função, principalmente, da natureza e da espessura do material, por uma elevação da temperatura. A energia é, assim, restituída ao volume a aquecer por convecção e radiação. Na eventualidade de existirem perdas de calor, a solução passa pela instalação de uma cortina de isolamento no espaço de ar, entre o vão envidraçado e a parede, que é fechada durante a noite (Chen e Chen, 2006).

### **2.3.3 Sistema solar passivo de ganho isolado**

Nos sistemas de ganho isolado, a captação de energia térmica ocorre num elemento ou espaço que se encontra termicamente isolado dos espaços habitáveis do edifício e utiliza a combinação dos efeitos dos sistemas solares de ganho direto e indireto. A energia solar é transferida para o interior por processos de convecção natural, caso existam orifícios que permitam a circulação de ar e radiação. Tendo em conta que, nos meses de verão o aquecimento é excessivo devido ao uso de vãos envidraçados, a divisão deve incluir sistemas de sombreamento passivo ou ativo em janelas verticais e claraboias operáveis de modo a contribuir para o arrefecimento do espaço.

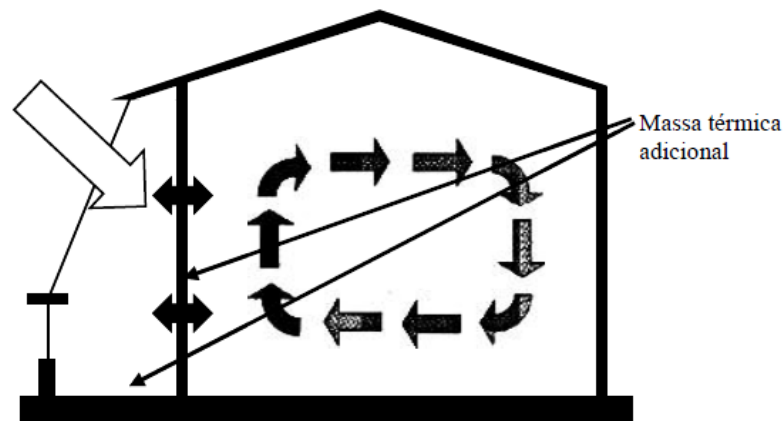


Figura 6 - Esquema de um sistema solar passivo de ganho isolado (adaptado de (Holtz et al., 1989)).

## 2.4 Materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase destacam-se pela sua elevada capacidade de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, possibilitando armazenar calor por unidade de volume superior aos materiais empregues na construção convencional. Podem ser caracterizados como materiais com capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, nomeadamente, numa estreita gama de temperaturas, através da absorção ou libertação de energia. No decorrer deste processo endotérmico, a temperatura do material mantém-se sensivelmente constante. Os PCM detêm a particularidade de armazenar energia térmica tanto na forma de calor latente bem como na forma de calor sensível. Na Figura 7 é possível verificar os fenómenos mencionados, em que, numa primeira fase (estado sólido), o PCM absorve energia na forma de calor sensível e, quando atinge a temperatura de fusão, passa a absorver calor latente. A partir do momento em que é atingido o limite de capacidade de armazenamento de calor latente, o material funde por completo e volta a armazenar apenas calor sensível. As mudanças de fase ocorrem, maioritariamente, na fase sólido-líquido, devido às pequenas variações de volume no processo (Shilei et al., 2007).

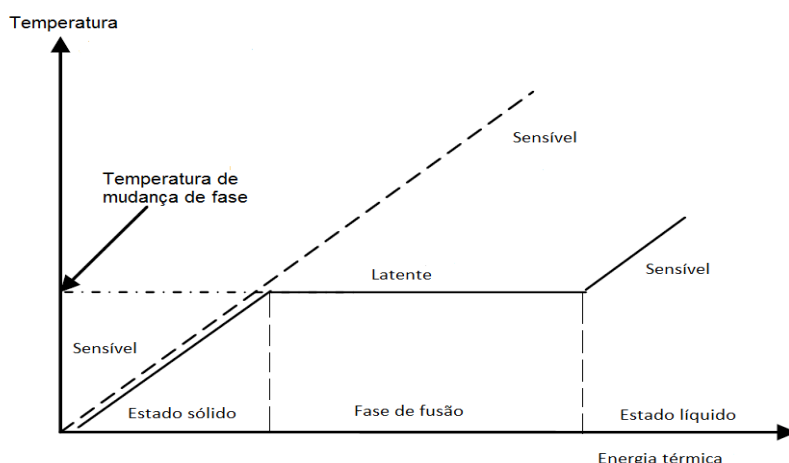


Figura 7 - Comportamento dos PCM em termos de calor sensível e latente armazenado (adaptado de (Gu et al., 2008)).

### 2.4.1 Propriedades

O armazenamento de calor latente por parte dos PCM deve-se ao fato deste material apresentar determinadas propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, económicas e ambientais. De entre as propriedades mencionadas, destacam-se conceitos como a condutividade térmica, o calor específico, a difusividade térmica e a inércia térmica, que conferem aos materiais de mudança de fase a capacidade de armazenamento térmico (Sharma et al., 2009)

A condutividade térmica representa-se por  $\lambda$  e expressa-se em  $\text{W}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Refere-se à quantidade de calor que atravessa, na unidade de tempo, uma superfície de área unitária, para uma diferença unitária de temperatura entre essa superfície e outra situada a uma distância unitária. A condutividade térmica determina uma maior ou menor facilidade de transferência de calor.

À quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um corpo (a pressão constante), dá-se o nome de calor específico, que se representa por  $c_p$  em  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  (Azenha, 2004). Para os materiais de construção, o valor do calor específico está contido no intervalo entre  $300 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \div 1500 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Uma exceção é a madeira, cujo valor específico está situado entre  $1500 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \div 2510 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ . A água ( $T = 10^\circ \text{C}$ ), por exemplo, é uma das matérias com maior calor específico,  $4187 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Deste modo, o teor de humidade nos materiais vai influenciar de uma forma significativa a sua capacidade de armazenamento térmico (Mendonça, 2005)

A difusividade térmica ( $\alpha_T$ ) é a designação atribuída à relação entre a condutividade térmica e o calor específico, como se pode verificar na Equação 2.1, e expressa-se em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2.1)$$

Representa uma medida da capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazenar (Azenha, 2004). Materiais com elevados  $\alpha_T$  respondem rapidamente a alterações térmicas no meio (como os metais), enquanto materiais com menor  $\alpha_T$ , (como por exemplo os materiais utilizados no isolamento térmico: poliestireno extrudido (Extruded Polystyrene - XPS), cortiça e outros responderão lentamente, demorando mais tempo a estabelecer nova condição de equilíbrio.

A inércia térmica pode caracterizar-se como a resistência dos sistemas térmicos para a alteração do seu estado termodinâmico. Tem origem na capacidade que os materiais apresentam para armazenamento térmico. Quanto mais elevado, mais energia é armazenada. A inércia térmica é ainda definida como uma função da densidade, do calor específico e pela capacidade térmica do material. Expressa-se em  $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$  e é apresentada segundo a Equação 2.2 (Azenha, 2004).

$$I = (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)^{1/2} \quad (2.2)$$

Na Tabela 1 estão identificados alguns dos critérios de ordem termofísica, cinética, química, económica e ambiental que os materiais de mudança de fase devem apresentar para aplicação em edifícios.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais de mudança de fase para aplicação em edifícios (adaptado de (Zalba et al., 2003)).

Propriedades	Características com potencial de aplicação em edifícios
Termofísicas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adequadas temperaturas de mudança de fase;</li> <li>2. Elevada capacidade de armazenamento de calor latente durante o processo de mudança de fase;</li> <li>3. Condutividade térmica, nas fases sólida e líquida, elevada;</li> <li>4. Calor específico e massa volúmica elevada;</li> </ol>
Cinéticas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ausência de sobrearrefecimento;</li> <li>2. Taxa de cristalização suficiente;</li> </ol>
Químicas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estabilidade química a longo prazo</li> <li>2. Reversibilidade na passagem sólido/líquido e líquido/sólido;</li> <li>3. Não inflamáveis, nem tóxicos, nem poluentes;</li> <li>4. Durabilidade (sem degradação ao fim de vários ciclos de fusão);</li> </ol>
Económicas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abundância de recursos;</li> <li>2. Disponibilidade para aplicação;</li> <li>3. Custo efetivo para larga produção;</li> </ol>
Ambientais	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixo impacto ambiental;</li> <li>2. Reciclável</li> </ol>

## 2.4.2 Classificação

A classificação dos PCM pode ser feita de acordo com o processo de mudança de fase: sólido  $\leftrightarrow$  líquido, sólido  $\leftrightarrow$  sólido, sólido  $\leftrightarrow$  gasoso e líquido  $\leftrightarrow$  gasoso, e de acordo com a sua composição química.

O calor latente envolvido na mudança de fase líquido  $\leftrightarrow$  gasoso (por exemplo, calor latente para derreter o gelo =  $334 \text{ kJ kg}^{-1}$  e calor latente para vaporizar a água =  $2260 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) é superior ao calor latente das mudanças de fase sólido  $\leftrightarrow$  líquido. As mudanças de fase líquidas  $\leftrightarrow$  gasosas envolvem maior calor latente. No entanto, não são utilizadas para armazenar energia uma vez que os gases ocupam elevados volumes à pressão atmosférica. Quanto às mudanças de fase sólidas  $\leftrightarrow$  sólidas, o calor latente envolvido apresenta valores baixos e também pequenas variações de volume. Deste modo, os materiais que fazem a transição entre o estado sólido e líquido são os mais adequados para o armazenamento de energia térmica em edifícios dado que envolvem uma pequena mudança de volume, menos que 10% (Sunliang, 2010).

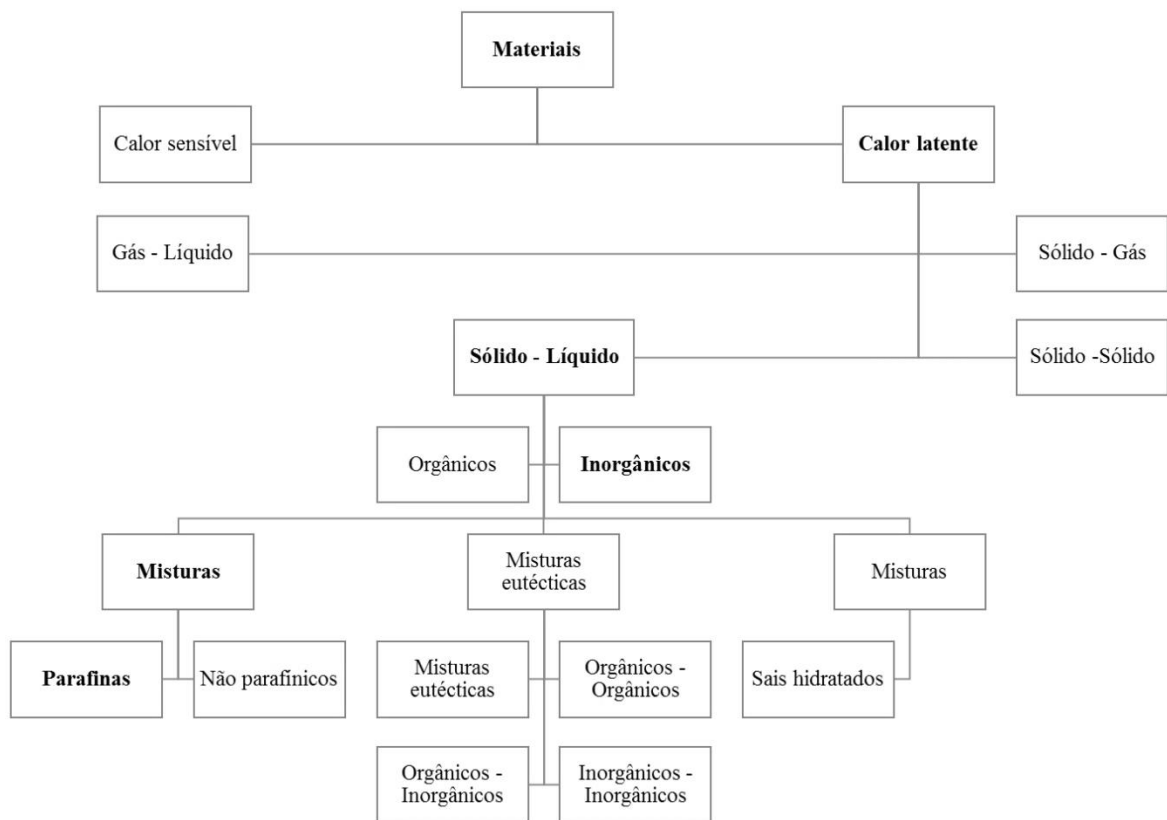


Figura 8 – Classificação dos PCM em diferentes categorias (adaptado de (Zalba et al., 2003)).

No processo de mudança de fase sólido-líquido, os PCM podem ser classificados em duas categorias distintas: orgânicos e inorgânicos (v. Figura 8). Estas categorias aparecem ainda subdivididas em misturas (de parafinas e ácidos gordos ou de sais hidratados) e misturas eutécticas. Cada grupo é caracterizado pela sua gama de temperaturas e entalpias de fusão (v. Figura 9).

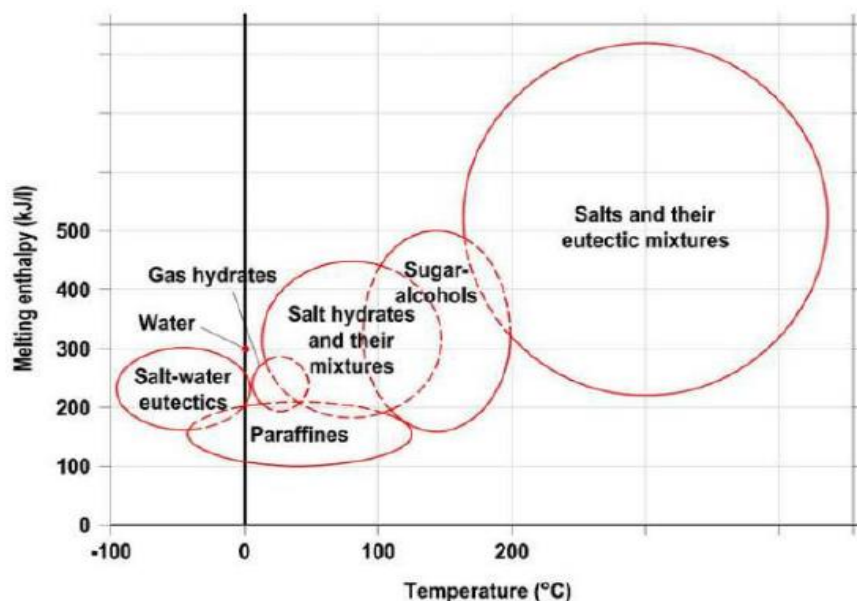


Figura 9 - Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão (adaptado de (Dieckmann, 2012)).

#### 2.4.2.1 PCM Orgânicos

Os materiais orgânicos, subdivididos em parafinas e ácidos gordos, são quimicamente estáveis, apresentam elevados valores para o calor latente de fusão, não são afetados pelo sub - arrefecimento e não são tóxicos nem corrosivos (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010).

As ceras de parafina comerciais, género mais comum, apresentam uma razoável capacidade de armazenamento de energia térmica, na gama dos  $120 \text{ kJ kg}^{-1}$  ÷  $210 \text{ kJ kg}^{-1}$  de entalpia de fusão, sendo económicos (Dieckmann, 2012). E, para além disso, encontram-se disponíveis numa vasta gama de temperaturas de fusão, aproximadamente, entre 20 e 70 °C. O recurso a calorímetros diferenciais (*DSC – Differential Scanning Calorimetry*) permitiu demonstrar que a performance térmica das mesmas não se degrada de modo significativo quando sujeitas a ciclos térmicos numerosos. Apesar das particularidades mencionadas, as parafinas apresentam condutividades térmicas baixas, na ordem dos  $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , e uma variação de volume considerável na transição de fase (Demirbas, 2006). De modo a contornar esta problemática são utilizadas fibras ou matrizes metálicas para aumentar a condutividade térmica bem como recipientes poliméricos para ultrapassar as referidas variações de volume.

Os compostos orgânicos não parafínicos incluem uma vasta série de materiais como álcoois, glicóis ou ácidos gordos, os quais apresentam boas características como a fusão e a



solidificação. Contudo são cerca de três vezes mais caros que os parafínicos (Hasnain S.M., 1998). De entre os PCM orgânicos não parafínicos, destacam-se os ácidos gordos. Este tipo de composto apresenta valores elevados de calor latente de fusão, na ordem dos  $155 \text{ kJ kg}^{-1} \div 180 \text{ kJ kg}^{-1}$ , baixa variação de volume no processo de mudança de fase e permite alcançar temperaturas de fusão e solidificação em gamas relativamente baixas,  $16^\circ\text{C} \div 6^\circ\text{C}$  e  $17^\circ\text{C} \div 64^\circ\text{C}$ , respetivamente. Porém, ainda existem poucos modelos com um intervalo de mudança de fase que se aproxime das temperaturas usuais de conforto térmico, aproximadamente,  $21^\circ\text{C}$ . No entanto, este valor varia consoante o valor de referência de cada país (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010).

#### **2.4.2.2 PCM Inorgânicos**

No que diz respeito aos materiais de mudança de fase inorgânicos, estes apresentam uma boa condutividade térmica, valores elevados de calor latente de fusão e destacam-se pelo seu módico custo. Em contrapartida, os materiais são suscetíveis à decomposição, corrosivos em relação à maioria dos metais e podem apresentar sub-arrefecimento, o que leva à alteração das suas propriedades de mudança de fase. Estes compostos inorgânicos são, maioritariamente, sais hidratados e apresentam características bastante atrativas para o armazenamento de energia térmica. Contudo, estas propriedades são difíceis de manter ao longo do ciclo térmico.

#### **2.4.2.3 Misturas eutécticas**

As misturas eutécticas resultam da combinação de dois ou mais compostos orgânicos, inorgânicos ou ambos, e podem apresentar temperaturas de transição mais próximas das necessidades do problema, do que os compostos apresentariam de modo isolado. O ponto de fusão desejado é obtido através da proporção selecionada para cada composto, sendo este o ponto fulcral das misturas eutécticas. Porém, as suas propriedades térmicas e físicas podem ser de difícil caracterização e o seu custo chega, em alguns casos, a ser o triplo dos compostos orgânicos e inorgânicos. As misturas eutécticas podem ser classificadas segundo três grupos: eutécticos orgânicos-orgânicos, inorgânico-inorgânicos e inorgânicos – orgânicos. Este género de material apresenta, por norma, temperaturas de fusão entre os  $18^\circ\text{C}$  e os  $51^\circ\text{C}$ , de

solidificação desde os 16 °C a 51 °C e calor latente de fusão na ordem dos 120 a 160 kJ kg<sup>-1</sup>. A título de exemplo, uma possível aplicação em edifícios é o eutético orgânico cáprico-láurico, o qual apresenta características adequadas para o armazenamento da radiação solar com ponto de fusão situado nos 18 °C, temperatura de solidificação de 17 °C e calor latente de fusão de 120 kJ kg<sup>-1</sup> (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010).

### **2.4.3 Incorporação de PCM em soluções construtivas**

#### **2.4.3.1 Microencapsulamento**

O microencapsulamento consiste no envolvimento de pequenas partículas de um composto, líquido ou sólido, por uma camada de material sendo este, na generalidade dos casos, polimérico. Dos materiais poliméricos destacam-se o poliuretano, PVC, poliestireno e a poliureia.

A técnica de microencapsulamento ocorre de modo a manter no interior da microcápsula o material nas condições operativas normais, promovendo a interação com o meio envolvente. Quanto à seleção do método a aplicar e do material para o encapsulamento, este deve ser feito com base nas componentes químicas, físicas e mecânicas, tendo estas que ser, necessariamente, estáveis com o meio e superfícies no qual o PCM vai interagir. O modelo de microencapsulamento mais utilizado é o da dispersão de “óleo em água” (Boh, Knez e Sumiga 2008), cujo assenta na dispersão de gotas de PCM numa solução aquosa. A formação das paredes do polímero em torno das gotas do PCM suspensas na solução, deve-se à aplicação de técnicas de polimerização *in situ* como é o caso da coacervação e a policondensação interfacial. As técnicas aplicadas possibilitam a produção de microcápsulas de PCM de dimensões reduzidas, facultando uma troca de rápida de calor com a envolvente, como é pretendido (Zhao e Zhang, 2011). A Figura 10 exemplifica a aplicação de PCM microencapsulado impregnado numa placa de gesso cartonado ThermalCORE™ da National Gypsum, que torna possível observar a microcápsula de PCM entre os cristais de gesso.

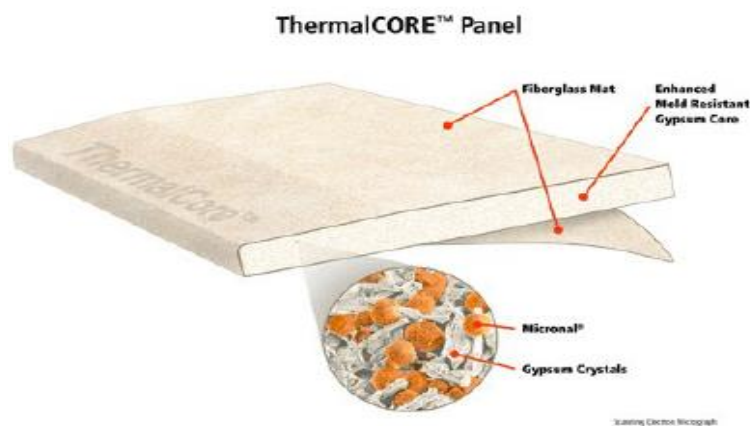


Figura 10 - Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM - ThermalCORE™ National Gypsum (adaptado de (Micronal ® PCM Gypsum Wallboards Phase Change).

### 2.4.3.2 Macroencapsulamento

No processo de macroencapsulamento, a incorporação de PCM ocorre em recipientes, usualmente em tubos ou bolsas distribuídas em matriz, em placas ou painéis. Relativamente à sua aplicação na construção, o PCM é colocado em camadas em vez de se encontrar no interior dos materiais (Khudhair e Farid, 2004). Este método permite evitar problemas de fuga, já que a fusão do material ou consequências nas propriedades mecânicas do material de construção são evitados. Porém, o macroencapsulamento pode exibir algumas irregularidades, nomeadamente, na condutividade térmica, visto que tende a gerar depósitos na cápsula resultando na inexistência de fusão do PCM aí patente (Sharma et al., 2009). No presente, este género de aplicação é a solução mais corrente, apesar de muito estudos apontarem no sentido da utilização de soluções envolvendo microencapsulamento (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010).

### 2.4.3.3 Imersão e incorporação directa

A imersão e a incorporação direta para além de apresentarem características semelhantes, tratam-se também dos métodos mais usuais de incorporar PCM nos materiais de construção (Hawes et al., 1993). No processo de imersão o material é inserido em PCM fundido para que os poros do material absorvam o PCM por ação capilar. A incorporação direta baseia-se em espalhar o PCM, em pó ou no estado líquido, sob o próprio material, sendo absorvido pelo mesmo. Tal como nos processos já abordados, estes métodos

apresentam possíveis problemas de fuga ou até mesmo incompatibilidade com alguns materiais de construção, que não os convencionais.

## **2.5 Materiais e componentes da construção com PCM**

A aplicação de materiais de mudança de fase em materiais e elementos construtivos para armazenamento de calor latente teve início no ano de 1980 (Sharma et al., 2009). Num mundo que valoriza cada vez mais formas de energia ecológicas a par do desenvolvimento natural das técnicas construtivas e produção de materiais, o impacto dos materiais de mudança de fase tem sido crescente e é na atualidade muito visível. O êxito dos PCM advém, em parte, da sua versatilidade de adaptação aos variados materiais e componentes construtivos que são necessários à construção dos edifícios. Na prática, os PCM podem ser empregues em sistemas passivos, encapsulados em paredes de betão, placas de gesso cartonado, tetos ou pavimentos para aumentar a capacidade de armazenamento de calor destes elementos. Capturam quer a energia térmica proveniente da convecção natural dos espaços interiores quer a energia solar incidente. Alguns exemplos de elementos construtivos que incorporam PCM são:

- Painéis de gesso cartonado;
- Elementos à base de betão;
- Dispositivos de sombreamento de envidraçados;
- Pavimentos radiantes;
- Tetos falsos;
- Painéis de isolante térmico.

### **2.5.1 Painéis de gesso cartonado**

Os painéis de gesso cartonado são estimados com um substituto eficaz e económico das tradicionais massas térmicas de armazenamento de energia solar nos edifícios. Usualmente empregues em paredes e tetos, as placas de gesso são ideais para a aplicação de PCM, sendo uma das soluções construtivas com PCM mais divulgada (Ahmad et al., 2006; Borreguero et al., 2011; Chen et al., 2008; Feldman et al. 1995; Kuznik e Virgone, 2009; Zhang et al., 2008)

Foram produzidas placas com 20% a 30% de PCM incorporados por imersão direta (Scalat et al., 1996) ou por microencapsulamento (Borreguero, A.M et al., 2011), com características térmicas diferenciadas em função da aplicação desejada. Verificou-se que as propriedades térmicas das placas de gesso com PCM são bastante próximas das dos PCM individuais. No caso de se proceder ao corte de uma placa, constata-se que uma elevada quantidade de PCM se concentra no último terço da espessura da placa próxima de cada face devido ao processo de difusão. Encontram-se placas disponíveis no mercado com uma temperatura de fusão de 23 °C e uma entalpia de fusão de 22 kJ kg<sup>-1</sup>.

A credibilidade desta solução construtiva foi defendida por Scalat (Scalat et al., 1996) numa investigação acerca da influência das placas de gesso cartonado com PCM na estabilização de temperaturas interiores de um compartimento com sistemas de climatização intermitentes. Os resultados comprovaram a capacidade de armazenamento térmico destes elementos, proporcionando temperaturas interiores dentro da gama de temperaturas de conforto, após o funcionamento dos sistemas de climatização, durante períodos de tempo mais longos.

Num outro estudo (Darkwa e O'Callaghan, 2006) foi comparado o comportamento térmico de duas placas de gesso cartonado distintas contendo PCM: uma constituída por uma folha de PCM com 2 mm de espessura e 10 mm de placa de gesso cartonado; a outra, uma placa uniforme de 12 mm composta por gesso cartonado e PCM aleatoriamente disperso. O ensaio foi realizado num edifício passivo, mais concretamente num espaço confinado com incidência de luz solar através de uma janela. Ao fim de um período de ensaio de 120 horas averiguou-se que a placa laminada foi a mais eficiente na obtenção de temperaturas mais razoáveis durante a noite, dado que o PCM laminado aumentou a temperatura noturna do espaço em mais de 17% que a placa de gesso com PCM aleatoriamente misturado.

Schmidt (Schmidt et al., 2007) concluíram que uma placa com PCM de espessura 1,5 cm equivale a uma parede de cimento de 14 cm ou a uma parede de tijolo de 36,5 cm em termos de armazenamento de calor latente.

### **2.5.2 Elementos à base de betão**

A integração de PCM nas paredes e pavimentos à base de betão obtém-se, quer pela mistura de PCM (encapsulado ou não) nas restantes matérias constituintes do betão (Cabeza et al., 2007; Sunke e Schultmann, 2009), quer pela imersão dos elementos de betão endurecido em PCM derretido ou em soluções aquosas contendo PCM.

O PCM pode também ser integrado em blocos de betão ou cimento por meio de incorporação ou imersão direta (microencapsulado ou não), imersão dos blocos em PCM líquido e/ou através da introdução de macrocápsulas com PCM.

Hawes (Hawes et al., 1993) assegurou que a modificação das propriedades do cimento em conjunto com a incorporação direta de PCM em blocos de betão aumenta a capacidade de absorção de calor. Todavia, Hawes alerta para a diminuição considerável da resistência mecânica dos blocos de betão, uma vez que esses são em parte compostos por PCM.

Quanto à parede de Trombe, as soluções maioritariamente utilizadas são as parafinas, ácidos gordos ou sais hidratados. Knowles (Knowles, 1981) usou parafina e aditivos metálicos para aumentar a condutibilidade térmica e a eficiência global de uma parede de Trombe. Bourdeau conclui que uma parede com PCM de apenas 8 cm de espessura apresenta um desempenho térmico superior a uma parede de alvenaria de 40 cm. Outros estudos (Chandra et al., 1985) confirmaram que uma parede de Trombe com PCM é mais eficiente em termos térmicos do que uma parede de Trombe convencional com maior espessura, apresentando maior capacidade de armazenamento de calor.

### **2.5.3 Dispositivos de sombreamento de envidraçados**

As portadas que englobam PCM são instaladas pelo exterior da envolvente envidraçada dos edifícios. Durante o dia, são abertas, a face interior fica exposta à radiação solar, promovendo a fusão do PCM através da absorção de calor. À noite, as portadas fecham-se e abrem-se as janelas com o propósito do calor latente na face interior fluir livremente para o interior do edifício (Sharma et al., 2009). Zalba (Zalba et al., 2004) assegura que a temperatura máxima à sombra é adiada em 3 horas, com um aumento da temperatura interior em 2 °C.

#### **2.5.4 Pavimentos radiantes**

A aplicação de PCM em pavimentos radiantes funciona como um limitador do fluxo de calor emitido pelo piso radiante. O sistema de aquecimento deverá estar ligado apenas algumas horas por dia, sendo o calor acumulado no PCM libertado gradualmente. Assim, o sistema de aquecimento poderá funcionar durante a noite, período durante o qual a tarifa de eletricidade é mais reduzida, e o calor libertado para o ambiente interior durante o dia. A aplicação deste método para além de ser mais económica é também mais ajustada para edifícios que possuam uma planta de eletricidade complexa, possibilitando gerir as cargas elétricas nos circuitos, caso o pavimento funcione a eletricidade (Sharma et al., 2009).

Athienities e Chen (Athienitis e Chen, 2000; Chen et al., 2008) analisaram a transferência de calor transiente (variável com o tempo) em sistemas de piso radiante. Focaram-se fundamentalmente na influência do tipo de revestimento do pavimento e na intensidade da incidência solar na distribuição de temperaturas pelo pavimento e no consumo energético. Para um espaço de ensaio exterior, as experiências e simulações revelam que a radiação solar direta poderá aumentar a temperatura superficial de um pavimento em 8 °C relativamente a um piso à sombra. Explicaram também que um revestimento em carpete aumenta esta desigualdade até 15 °C. Foi referido que a energia solar armazenada no pavimento reduz significativamente o consumo em aquecimento (30% ou mais).

#### **2.5.5 Tetos falsos**

Os tetos falsos com PCM são utilizados na refrigeração de zonas interiores durante a estação quente, com recurso ao arrefecimento noturno. O teto falso possui grelhas reguláveis que estão em contato com o exterior. Durante a noite, estas encontram-se abertas para deixar entrar o ar frio que arrefece a placa do teto falso, com a temperatura do PCM a baixar consideravelmente. Ao longo do dia, as grelhas fecham-se, faz-se circular o ar através da superfície superior do teto falso onde o PCM com uma temperatura inferior à temperatura ambiente, absorve calor até mudar para o estado líquido.

### **2.5.6 Painéis de isolamento térmico**

Durante a última década foram realizados estudos sobre a incorporação de PCM em espuma de poliuretano (Kośny et al.; Kosny et al., 2007) e celulose (Kośny et al.; Kosny et al., 2006; Kosny, 2008). A espuma de poliuretano com PCM foi distribuída em duas camadas de 6 mm entre três chapas de alumínio de baixa emissividade e instalada no topo de vigas de isolamento de lã mineral. A espuma incluía  $0,49 \text{ kg m}^{-2}$  de PCM com um ponto de fusão de  $25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e uma entalpia máxima de  $140 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Em comparação com o fluxo de calor em construções tradicionais, este mostra uma potencial redução em 40% da carga de arrefecimento na hora de pico. Foi aplicado o mesmo método em sótãos, que resultou numa diminuição da temperatura interior no verão de  $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Baetens et al., 2010).

Evers (Evers et al., 2010) realçam a aplicação de PCM em celulose de isolamento, na forma de parafina e de sais hidratados. Os resultados apontam que a parafina reduz a taxa de transferência de calor entre 5,7% a 9,2%. Em contrapartida, o uso de sais hidratados demonstrou resultados negativos, aumentando o fluxo de calor.

## **2.6 Transferência de calor**

O papel de regulador térmico dos PCM só faz sentido porque o comportamento térmico de um edifício não é estático, mas sim um sistema dinâmico de mudanças de temperatura, com trocas contínuas de calor com o meio exterior.

Sempre que entre dois ou mais sistemas se estabelece uma diferença de temperaturas, iniciam-se permutas de calor entre vários corpos até que se alcance uma temperatura homogénea a todos eles, lei zero da termodinâmica. Estas trocas podem surgir de três formas: condução, convecção e radiação. Geralmente, estes três mecanismos atuam em simultâneo.

### **2.6.1 Condução**

A condução de calor consiste no processo de transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas devido a um gradiente de temperatura, sem movimento interno da matéria. A proximidade entre as partículas define o grau de facilidade de



propagação de calor entre as partículas. Portanto, a condução ocorre sobretudo entre corpos sólidos, verificando-se igualmente em meios líquidos e gasoso com menor intensidade.

Este mecanismo pode decorrer em regime estacionário, em que não se registam variações da temperatura no tempo, ou em regime transiente, com variação de temperatura no tempo. Num edifício, a condução de calor ocorre sempre em regime transiente, dado que as temperaturas dos meios interior e exterior estão em constante mudança.

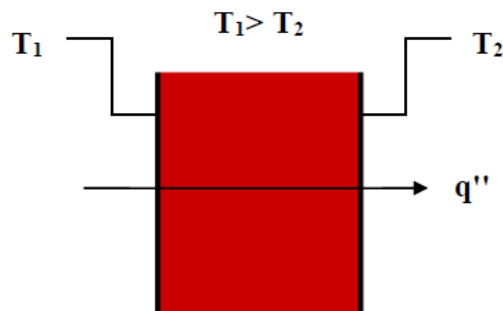


Figura 11 - Condução de calor através de um sólido (adaptado de (Azenha, 2004)).

A condução de calor pode ser escrita através da expressão geral da equação de Fourier, a qual permite calcular a temperatura em qualquer ponto do espaço de uma partícula elementar. Para valores contantes da condutibilidade térmica, a expressão é, em geral, escrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (2.3)$$

No caso de um sólido homogéneo, isotrópico e sem geração interna de calor, a equação geral da condução de calor apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

A parcela  $\dot{Q}$  representa a taxa de geração de energia por unidade de volume no meio, simultânea com a geração interna de calor. O símbolo  $T$  equivale à distribuição de temperatura no espaço ( $x, y, z$ ) e à sua variação no tempo,  $t$ .

### 2.6.2 Convecção

A convecção é a forma corrente de transmissão de calor entre um fluido e uma superfície sólida que surge devido ao movimento do fluido por alteração da sua densidade resultante de um diferencial de temperaturas. A convecção processa-se sob dois mecanismos: difusão (movimento molecular aleatório) e advecção (movimento macroscópico do fluido).

Um exemplo de convecção é o efeito do funcionamento de um ar-condicionado no arrefecimento da temperatura ambiente de um espaço. O ar frio emitido pelo equipamento, o qual é colocado junto ao teto, tende a substituir a camada de ar quente, que é menos densa, junto ao pavimento. A este movimento dá-se o nome de convecção.

O conceito de convecção é muito complexo uma vez que, depende de vários parâmetros do fluido, tais como a densidade, a viscosidade, a condutibilidade térmica e o calor específico; das características da superfície de contacto, tais como a geometria, rugosidade e orientação; e das condições de fluxo (regime laminar ou turbulento).

Apresentam-se em geral dois tipos de convecção associados aos espaços interiores:

- Convecção livre: o fluxo é causado pelas diferenças de densidade provocadas pelas diferenças de temperatura;
- Convecção forçada: o fluxo é causado por meios externos (circulação de ar: vento, ventoinhas, etc.).

A transferência de calor por convecção rege-se pela lei de Newton, indicada na seguinte expressão (Equação 2.5):

$$q'' = h_{conv} (T_s - T_f) \quad (2.5)$$

onde:

$q''$  = Fluxo convectivo de calor por unidade de área ( $\text{W m}^{-2}$ );

$h_{conv}$  = Coeficiente de convecção ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ );

$T_s$  = Temperatura de superfície (K ou °C);

$T_f$  = Temperatura do fluido, em zona não perturbada pela superfície (K ou °C).

O fluxo de calor entre o sólido e o fluido varia linearmente com a diferença de temperatura entre ambos. O coeficiente de convecção,  $h_{conv}$ , é influenciado pelas

características do fluido e da superfície acima enunciadas, podendo alterar ao longo da superfície de contacto.

### 2.6.3 Radiação

A transmissão de calor por radiação diferencia-se dos mecanismos anteriores referidos, pois não requer a presença de um meio material. A permutação de energia térmica por radiação está associada à emissão de calor por um corpo em virtude da respetiva temperatura. Todos os corpos, mesmo a baixas temperaturas, irradiam energia, ou sob a forma de fotões discretos, ou sob a forma de ondas eletromagnéticas. Independentemente da forma de emissão, a radiação térmica abrange o espectro das radiações eletromagnéticas compreendido entre os comprimentos de onda de  $10^{-7}$  m e  $10^{-3}$  m.

As três grandezas articuladas à incidência de energia radiante num corpo, a absorvidade ( $\alpha$ ), a refletividade ( $\rho$ ) e a transmissividade ( $\tau$ ), são função do comprimento de onda da radiação incidente. A totalidade das frações de energia absorvida, refletida e transmitida é igual à unidade, isto é:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.6)$$

A energia transmitida por radiação, por unidade de área da superfície, correspondente à taxa de emissão de radiação é designada por radiância,  $E$ , obedecendo à chamada lei de Stefan-Boltzmann (Equação 2.7):

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.7)$$

em que:

$\varepsilon$  = Emissividade (capacidade de emissão da radiação) ( $0 \div 1$ );

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,76 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ );

$T_s$  = Temperatura da superfície, (K).

As trocas de calor por radiação entre uma superfície e o meio circundante traduzem-se na seguinte expressão (Equação 2.8), análoga à que traduz as trocas por convecção:

$$q''_{rad} = h_r (T_s - T_f) \quad (2.8)$$

Onde,  $h_r$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação, alterando em função da geometria e temperatura de superfície. Este índice é tipicamente designado por condutância térmica superficial por radiação, dado pela subseqüente expressão simplificada (Equação 2.9):

$$h_r = 4 \varepsilon \sigma T_m^3 \quad (2.9)$$

em que:

$$T_m = \frac{T_s + T_f}{2} \quad (2.10)$$

define a temperatura média entre a superfície e o meio envolvente.

Outra parcela da radiação de grande importância é a radiação solar. O comportamento térmico dos edifícios é influenciado pela radiação solar, quer pelos ganhos significativos por meio do vão envidraçada, quer pela influência na temperatura superficial da envolvente opaca.

## 2.7 Problemática de transferência de calor em PCM

No decorrer dos processos de carga e descarga dos PCM, os possíveis mecanismos de transferência de calor são a condução e a convecção. Porém, a questão de qual dos dois fenômenos tem o papel fundamental na transferência de calor em diferentes momentos da transformação de fase tem sido debatida desde há décadas (Liu et al., 2014). Sempre que os PCM são utilizados para armazenar ou libertar energia, a condução é frequentemente considerada como tendo uma ação mais influente na transferência de calor durante os processos de mudança de fase (Khodadadi e Zhang, 2001; Costa et al., 1998; Ho e Chu, 1996). Em contrapartida, alguns investigadores persistem em considerar que a convecção natural se trata do mecanismo mais importante no processo de mudança de fase, particularmente na região de fusão. Sparrow (Bell, 1982) concluiu, em 1977, que a convecção natural não poderia ser ignorada na análise de problemas de mudanças de fase. No ano de 1994, Hasan (Hasan, 1994) afirmou que a convecção tem um papel determinante durante o processo de fusão e que um modelo simplificado, que considerasse apenas a transferência de calor por condução, não descreveria apropriadamente o processo de fusão

de um PCM. Posteriormente, Lacroix mencionaram resultados idênticos na sua pesquisa de que a convecção natural será o mecanismo de transferência de calor principal durante o processo de fusão. Em 1999, Velraj (Velraj et al., 1999) obteve a mesma conclusão na sua investigação e reportou que, no decorrer da fusão, verifica-se a ocorrência de convecção natural na camada de material que funde, revertendo no aumento da taxa de transferência de calor em comparação com o processo de solidificação. Num outro estudo, Buddhi (Buddhi e Bansal, 1988) sugeriram uma explicação para este episódio: as discrepâncias de densidade entre o estado sólido e o líquido de PCM induzem movimentos convectivos no estado líquido. Zhang e Yi (Yinping et al., 1999) asseguraram que com a passagem do estado sólido a líquido, o volume de PCM continuava a aumentar, resultando em que a convecção fosse o fenómeno de transferência de calor principal, em oposição à condução.

Liu (Liu et al., 2014) afirmaram que o PCM altera a sua fase de sólido para um estado mole e sem consistência, e depois para líquido, de modo que estes estados são reversíveis durante o processo de solidificação. Deste modo, existem seis estados até que se complete um ciclo de carga e descarga. Em suma, é possível que, em determinados estados do processo de transformação de fase, existam mais do que um género de mecanismo de transferência de calor atuando em paralelo, sendo o grande desafio dos investigadores o de como pesar as diferentes percentagens de convecção e condução em cada estado.

### 3. Metodologia de análise

Neste capítulo pretende-se apresentar de modo detalhado a metodologia do trabalho desde a caracterização do modelo de simulação, definição das considerações e pressupostos gerais. Ao longo da metodologia adotada são também justificadas todas as opções tomadas.

#### 3.1 Modelação de sistemas solares passivos

##### 3.1.1 Metodologia de Drolen

Para o desenvolvimento da simulação térmica de um sistema solar passivo de ganho direto centrou-se o estudo num modelo de experiência antigo que efetuou medições do desempenho energético, em edifícios de construção solar passiva, para todos os sistemas passivos. Este modelo, avançado por Bruce Lee Drolen tem como propósito desenvolver metodologias mais amplificadas na determinação do desempenho térmico (Drolen, 1979). Para este fim, B. L. Drolen (Drolen, 1979) definiu parâmetros de desempenho adimensionais, os quais foram derivados a partir de equações diferenciais. Ainda no seu trabalho, B. L. Drolen (Drolen, 1979) baseou-se num modelo de decomposição nodal, sendo estes governados pelas equações apresentadas no subcapítulo “Metodologia de Drolen”.

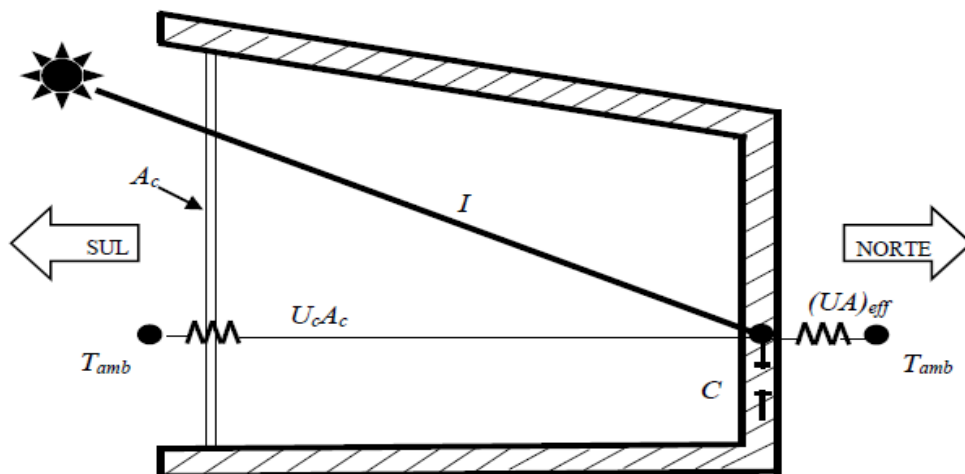


Figura 12 – Esquema de um sistema de ganho direto (adaptado de (Drolen, 1979)).

Na Tabela 2 encontram-se identificados os principais parâmetros associados a um sistema de ganho direto.

Tabela 2 - Parâmetros associados ao sistema de ganho direto.

Parâmetros	Unidades
Área do coletor, $A_c$	$m^2$
Radiação incidente, $I$	$W\ m^{-2}$
Temperatura ambiente, $T_{amb}$	$^{\circ}C$
Condutância da envolvente não solar, $(UA)_{eff}$	$W\ K^{-1}$
Condutância do coletor, $U_c A_c$	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$

### Balanco energético

No método de decomposição nodal, o sistema é dividido em elementos (nós), nos quais se considera existirem as mesmas condições de temperatura e fontes de calor. As temperaturas nodais são regidas pelo seguinte conjunto de equações diferenciais lineares:

i. Dia ( $0 \leq t \leq t_D$ ):

$$C \frac{dT_1}{dt} = \eta_0 I A_c - [U_c A_c + (UA)_{eff}] (T_1 - T_a) \quad (3.1)$$

ii. Noite ( $t_D \leq t \leq 24\ h$ ):

$$C \frac{dT_2}{dt} = - [U_c A_c + (UA)_{eff}] (T_1 - T_a) \quad (3.2)$$

Condições iniciais:

$$T_1(0) = T_2(24\ h) \quad (3.3)$$

$$T_1(t_D) = T_2(t_D) \quad (3.4)$$

A Equação 3.1 adota a seguinte forma:

$$\frac{C}{U_C A_C + (UA)_{eff}} \frac{dT}{dt} = \frac{\eta_0 I A_C}{U_C A_C + (UA)_{eff}} \quad (3.5)$$

Pode-se definir:

$$\Delta T_{ref} = \frac{\eta_0 I A_C}{U_C A_C + (UA)_{eff}} \quad (3.6)$$

Deste modo,

$$\frac{\frac{C}{U_C A_C + (UA)_{eff}} \frac{dT}{dt}}{\frac{\eta_0 I A_C}{U_C A_C + (UA)_{eff}}} = 1 - \frac{T - T_a}{\frac{\eta_0 I A_C}{U_C A_C + (UA)_{eff}}} \quad (3.7)$$

Portanto, é possível definir:

$$T^* = \frac{T - T_a}{\frac{\eta_0 I A_C}{U_C A_C + (UA)_{eff}}} = \frac{T - T_a}{\Delta T_{ref}} \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow dT^* = \frac{dT}{\Delta T_{ref}} \quad (3.9)$$

Voltando à Equação 3.7:

$$\frac{C}{U_C A_C + (UA)_{eff}} \frac{dT^*}{dt} = 1 - T^* \quad (3.10)$$

### Resistências térmicas

A cada elemento (nó) está associado uma determinada capacidade térmica, e os elementos estão ligados entre si por resistências térmicas. Na Figura 12 estão representadas as resistências térmicas  $R_1$  e  $R_2$  associadas ao modelo simples de casa solar.



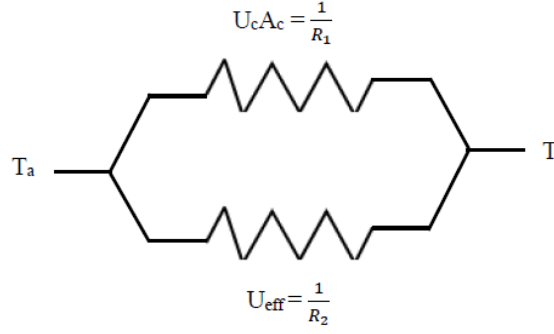


Figura 13 – Esquema de uma resistência térmica para um modelo de ganho direto simples.

A resistência total equivalente,  $R_{TOTAL}$ , é facultada pela Equação 3.11:

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3.11)$$

ou,

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = U_c A_c + (UA)_{eff} \quad (3.12)$$

Por fim, obtém-se a forma adimensional da Equação 3.1:

$$\frac{dT_1^*}{dt^*} = 1 - T_1^* \quad (3.13)$$

Onde,

$$t^* = \frac{t}{R_{TOTAL}C} \quad (3.14)$$

em que:

$R_{TOTAL}C = \tau$  = Constante de tempo do sistema.

Desta forma, a Equação 3.13 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dT_1^*}{dt^*} + T_1^* = 1 \quad (3.15)$$

E a Equação 3.12 é a equação homogénea correspondente, isto é, sem o termo de fonte de energia:

$$\frac{dT_2^*}{dt^*} + T_2^* = 0 \quad (3.16)$$

A solução da Equação 3.16 é dada por:

$$T_2^* = A_2 e^{-t^*} \quad (3.17)$$

Uma solução particular para a Equação 3.13 é  $T^* = 1$ . Portanto, a solução completa para a expressão é:

$$T_1^* = A_1 e^{-t^*} + 1 \quad (3.18)$$

Aplicando as condições iniciais:

$$T_1(0) = T_2(24 h) \Rightarrow T_1^*(0) = T_2^*\left(\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}\right) \quad (3.19)$$

$$T_1(t_D) = T_2(t_D) \Rightarrow T_1^*\left(\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}\right) = T_2^*\left(\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}\right) \quad (3.20)$$

A série de equações lineares é então resolvida em ordem a A1 e A2 do seguinte modo:

$$\begin{cases} A_1 + 1 = A_2 e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}} \\ A_1 e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}} + 1 = A_2 e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}} \end{cases} \quad (3.21)$$

Ou então:

$$\begin{cases} A_1 - A_2 e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}} = -1 \\ A_1 e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}} - A_2 e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}} = -1 \end{cases} \quad (3.22)$$

Para a solução de A1 e A2, obtém-se o seguinte sistema:

$$\begin{cases} A_1 = -\frac{1 - \frac{e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}}}{e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}}}}{1 - e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}}} \\ A_2 = -\frac{1 - \frac{e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}}}{e^{-\frac{t_D}{R_{TOTAL}C}}}}{1 - e^{-\frac{24 h}{R_{TOTAL}C}}} \end{cases} \quad (3.23)$$

### 3.1.2 Metodologia de Kosar

D. R. Kosar (Kosar, 1981), tal como B. L. Drolen (Drolen, 1979), desenvolveu um modelo tendo como pressuposto metodologias mais alargadas na determinação do desempenho térmico. Para este efeito, D. R. Kosar (Kosar, 1981) criou vários planos de testes tais como um plano de teste de simulação e um plano de teste fatorial. O plano de testes de simulação contém determinadas regras de ouro, as quais incluem valores paramétricos necessários na investigação dos sistemas solares passivos. Na Tabela 3 encontra-se destacado alguns dos valores com carácter de maior interesse para o presente estudo e que foram utilizados em determinados cálculos.

Tabela 3 – Valores paramétricos indicados por D. R. Kosar para o estudo de sistemas solares passivos (Kosar, 1981).

Características	Unidades	Valores
Armazenamento térmico por metro quadrado da área coletora, $C_{N-PCM}$	$J K^{-1} m^{-2}$	$9,20 \times 10^5$
Massa volúmica da parede sem PCM, $\rho_{N-PCM}$	$Kg m^{-3}$	2403
Calor específico do material sem PCM, $c_{p, N-PCM}$	$J kg^{-1} K^{-1}$	836
Condutibilidade térmica do material sem PCM, $k_{N-PCM}$	$W m^{-1} K^{-1}$	1,73
Condutibilidade térmica do coletor, $k$	$W m^{-1} K^{-1}$	$1,56 \div 6,25$
Transmissividade, $\tau$	-	$0,56 \div 0,86$
Absortância solar da massa de armazenamento térmico, $\alpha_s$	-	$0,80 \div 1,00$
Radiação incidente, $I$	$W m^{-2}$	250
Condutância da envolvente não solar, $(UA)_{eff}$	$W K^{-1}$	500

Relativamente ao plano de teste fatorial, D. R. Kosar (Kosar, 1981) recorreu ao uso do programa PASSIM para efetuar as simulações. O programa PASSIM apresenta vantagens como, por exemplo: utiliza o método de decomposição nodal que o torna muito versátil em termos de adaptação aos sistemas em estudo; permite a construção de modelos com um elevado número de nós.

## 3.2 Simulação numérica (EXTEND™)

Como foi referido no segundo capítulo, este trabalho recorre ao software EXTEND™ como uma ferramenta de simulação. O EXTEND™ foi desenvolvido por Bob Diamond em 1965, para a NASA. Bob Diamond era na época estudante e iniciou a programação de

modelos de simulação. No ano de 1987, foi fundada a empresa *Imagine That, Inc.* com o propósito de desenvolver e comercializar o programa EXTEND™, convertendo-se no primeiro aplicativo de simulações disponível para qualquer tipo de utilizador.

No EXTEND™, os modelos são criados através da adição de blocos ao ambiente de trabalho, seguindo-se a introdução dos dados de simulação e por fim, a conexão dos blocos. Cada tipo de bloco apresenta a sua própria funcionalidade, executando uma série de funções no modelo de simulação. O programa requer que seja sempre aplicada uma função na entrada da simulação, baseando-se num valor de outro ponto do modelo. Neste caso de estudo, o EXTEND™ mostra-se bastante prático pois recorre a métodos numéricos para resolução de equações diferenciais representativas de fenómenos de transferência de calor. Há vários métodos que resolvem analiticamente uma equação diferencial ordinária. No entanto, nem sempre é possível obter uma solução analítica. Neste caso, os métodos numéricos são uma saída para se encontrar uma solução aproximada. O programa EXTEND™ recorre ao método de Euler implícito (*backward* Euler) para a integração das equações que lhe são facultadas. Os métodos explícitos e implícitos são aproximações utilizadas na análise numérica para a obtenção de soluções dependentes do tempo, de equações diferenciais ordinárias e parciais, como é imposto em simulações computacionais de processos físicos. Os métodos explícitos calculam o estado do sistema num tempo posterior ao estado atual do sistema, enquanto que os métodos implícitos encontram a solução resolvendo uma equação que envolve ambos os estados do sistema. Matematicamente, se  $Y(t)$  é o estado atual,  $Y(t + \Delta t)$  é o estado posterior ( $\Delta t$  é um pequeno passo de tempo). O método de Euler implícito proporciona uma resolução de equações mais estável e possibilita a utilização de um maior passo  $\Delta t$ .

Durante e após a execução da simulação do sistema solar passivo de ganho direto, os resultados são relatados dentro dos blocos, exibidos em *plotters*. Na Tabela 4 são indicados os principais componentes utilizados para a criação do modelo de simulação, seguindo-se a Tabela 5 com a apresentação dos dados de entrada (*inputs*) e os dados de saída (*outputs*).

Tabela 4 - Principais componentes utilizados no EXTEND™.

Componentes	Descrição
<i>Constant</i>	Gera um valor constante para cada passo, o qual é especificado na caixa de diálogo. Normalmente, este elemento é utilizado para definir o valor para as entradas dos outros blocos.
<i>Conversion table</i>	Este componente funciona como uma tabela de pesquisa que contém uma tabela de valores ( $x$ define as entradas e $y$ as saídas).
<i>Decision</i>	Bloco definido para a tomada de decisão, baseia-se nas entradas e na lógica interna que é definida.
<i>Devide Equation</i>	Secção responsável pela divisão das equações inseridas. Emite os resultados de uma equação introduzida na caixa de diálogo. A equação deve ser da forma "Resultados = Fórmula".
<i>Holding tank</i>	Este item acumula os valores da entrada, permite solicitar um valor a ser removido e gera um valor solicitado, se estiver disponível.
<i>Multiply</i>	Multiplica os valores introduzidos à entrada e, na saída obtém-se o resultado.
<i>System Variable</i>	Assume valores de um sistema variável.

Tabela 5 - Inputs e Outputs do EXTEND™.

Inputs	Outputs
Tempo	Temperatura em função do tempo para um modelo de
Insolação	ganho direto.
Eta zero	Variação sinusoidal da temperatura interior e variação
Área coletora	da insolação em função do tempo.
Condutividade térmica do coletor	Variação sinusoidal da temperatura interior em função
Coeficiente de perda	do tempo e variação da insolação e da temperatura
Armazenamento térmico	exterior em função do tempo.
Temperatura ambiente	Variação sinusoidal da temperatura interior, variação
	da insolação e variação da temperatura exterior, com
	aplicação de materiais de mudança de fase.

### 3.3 Abordagem

#### 3.3.1 Valores utilizados no balanço energético

As equações referidas nos subcapítulos “Metodologia de Drolen” e “Metodologia de Kosar” foram resolvidas a partir dos valores de  $I$ ,  $U_C$  e  $(UA)_{eff}$ , apresentados por D. R. Kosar (Kosar, 1981). O valor de  $\eta_0$  foi calculado a partir da Equação 3.24:

$$\eta_0 = \tau \alpha_s \quad (3.24)$$

Para além dos valores mencionados, foram assumidos os seguintes valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores assumidos para a resolução das equações.

Parâmetros	Unidades	Valores
$A_c$	$m^2$	50
$t_D$	s	28800
$t_{24h}$	s	86400
$T_{amb}$	$^{\circ}C$	15

Tabela 7 - Valores obtidos na resolução das equações mencionadas.

Parâmetros calculados	Unidades	Valores
$C$	$J K^{-1}$	$4,60 \times 10^7$
$U_c A_c$	$W K^{-1}$	312,50
$\eta_0 A_c I$	W	$1,13 \times 10^4$
$R_{TOTAL}$	$W^{-1} K$	$1,20 \times 10^3$
$\Delta T_{Ref}$	K	13,85
$R_{TOTAL} C$	s	$5,66 \times 10^4$
$e^{-24h/(R_{TOTAL} C)}$	-	0,22
$e^{-t_D/(R_{TOTAL} C)}$	-	0,60
$A_1$	-	-0,82
$A_2$	-	0,85

### 3.3.2 Determinação da espessura dos materiais

Um dos aspetos analisados foi a variação da espessura da parede no caso de se idealizar uma parede de Trombe. Para além dos valores paramétricos, D. R. Kosar (Kosar, 1981) apresenta uma diversidade de equações ao longo da sua simulação, de entre as quais se destaca a equação que leva ao cálculo da espessura de uma parede de Trombe.

$$\Delta L = \frac{C}{\rho c_p} \quad (3.25)$$

onde,

$\Delta L$  = Representa a espessura da parede (m);

$C$  = Armazenamento térmico por metro quadrado de área coletora ( $J K^{-1} m^{-2}$ );

$\rho$  = Massa volúmica do material ( $kg m^{-3}$ );

$c_P$  = Calor específico do material ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ).

Como ponto de partida, recorreu-se à Equação 3.25 para determinar o valor das diferentes espessuras a utilizar na composição da parede. Isto é, a espessura do material de armazenamento térmico, por calor sensível, a combinar com a espessura de PCM. A Equação 3.25 foi sujeita às seguintes alterações:

$$\Delta L_1 = \frac{C_{N-PCM} \text{Área}_{\text{vão envidraçado}}}{\rho c_P \text{Área}_{\text{parede}}} \quad (3.26)$$

$$\frac{C_{N-PCM} \text{Área}_{\text{vão envidraçado}}}{\rho_{N-PCM} c_{P,N-PCM} \text{Área}_{\text{parede}}} = \Delta L_1 + \frac{C_{N-PCM} \text{Área}_{\text{vão envidraçado}}}{\rho_{PCM} c_{p,PCM} \text{Área}_{\text{parede}}} \quad (3.27)$$

em que,

$\Delta L_1$  = Espessura do material de alvenaria (m);

$C_{N-PCM}$  = Armazenamento térmico por metro quadrado de área coletora ( $J K^{-1} m^{-2}$ );

$\text{Área}_{\text{vão envidraçado}} = \text{Área}_{\text{parede}} = \text{área total}$  ( $m^2$ );

$\rho_{N-PCM}, \rho_{PCM}$  = Massa volúmica do material de alvenaria e do PCM, respetivamente, ( $kg m^{-3}$ );

$c_{p,N-PCM}, c_{p,PCM}$  = Calor específico do material de alvenaria e do PCM, respetivamente, ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ).

Por fim, temos que:

$$\Delta L_1 = \frac{C_{N-PCM} - \rho_{PCM} c_{p,PCM} \Delta L_2}{\rho_{N-PCM} c_{p,N-PCM}} \quad (3.28)$$

e,

$$\Delta L_{\text{TOTAL}} = \Delta L_1 + \Delta L_2 \quad (3.29)$$

onde,

$\Delta L_{TOTAL}$  = Espessura total da parede de Trombe (m);

$\Delta L_1$  = Espessura do material de alvenaria (m);

$\Delta L_2$  = Espessura do PCM (m).

Para o cálculo de  $\Delta L_1$ , assumiu-se que o valor da espessura do material de mudança de fase seria  $\Delta L_2 = 2,5$  cm. De acordo com Dieckmann, para cada material são necessárias diferentes espessuras para se verificar o mesmo armazenamento térmico (Dieckmann, 2012). A Figura 14 mostra um exemplo de comparação entre a capacidade de armazenamento de calor para cada material usado na construção de um edifício. Pode-se observar que se necessita de uma menor espessura no caso de recorrer aos PCM comparativamente aos outros materiais para a mesma quantidade de armazenamento.



Figura 14 – Comparação da espessura entre o PCM e os outros materiais de construção (Dieckmann, 2012).

### 3.3.3 Determinação do valor do calor específico

No decorrer deste trabalho utilizar-se-á o valor do calor específico de um compósito de PCM, para isso foi necessário obter o respetivo valor do calor específico médio.

Kuznik, e Virgone (Kuznik e Virgone, 2009) estudaram a incorporação de PCM microencapsulado em placas de gesso cartonado. Nesse estudo comparativo, utilizaram células de teste com e sem a incorporação de PCM. A célula de teste que incluía o PCM era constituída por cerca de 60% de parafina microencapsulada e, o material final do compósito de PCM era uma folha de 5 mm com  $\rho = 900 \text{ kg m}^{-3}$ . Relativamente à parafina, pode-se dizer que este material de mudança de fase pertence ao grupo dos PCM orgânicos, tal como foi mencionado no capítulo anterior. Na Tabela 8 são referenciadas



algumas das características típicas dos PCM orgânicos, na qual se encontra o valor da condutividade térmica que será necessário para cálculos a realizar posteriormente.

Tabela 8 - Características dos PCM orgânicos (Vaz, 2012).

Designação comercial	Temperatura de fusão $T / ^\circ\text{C}$	Entalpia de fusão $\Delta h_{fus} / \text{kJ kg}^{-1}$	Calor específico $c_p / \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Condutividade térmica $k / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Parafina C16-C18	20-22	152	-	-
Parafina C13-C24	22-24	189	0,21	0,21
Parafina C28	28	244	2,16	0,15
<i>Butyl stearate</i>	19	140	-	-
1 - Dodecanol	26	200	-	-
<i>n</i> - Octadecane	28	200	-	-
<i>Vinyl stearate</i>	27-29	122	-	-

A medição da capacidade calorífica do compósito de PCM realizou-se pelo DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) e foram, então, obtidas as curvas representativas da variação do calor específico do material experimental.

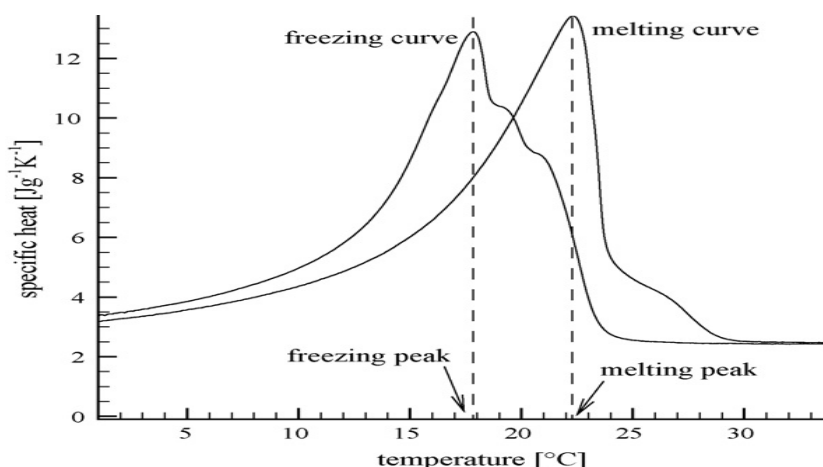


Figura 15 - Variação do calor específico do compósito de PCM (Kuznik e Virgone, 2009).

A partir da curva de aquecimento da Figura 15 foi possível obter o valor do calor específico médio. Procedeu-se, então, à reprodução da curva mencionada bem como à reprodução da curva de variação de entalpia.

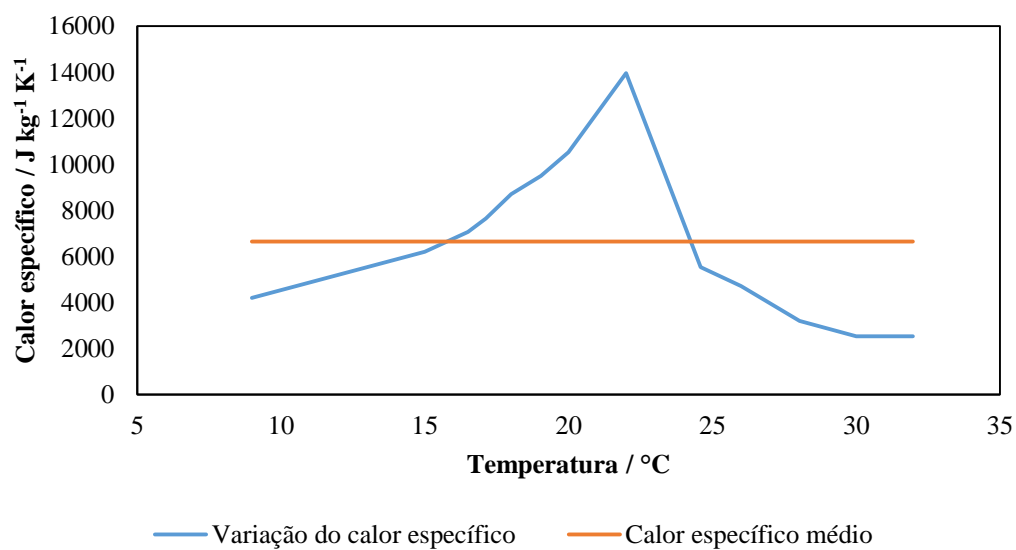


Figura 16 - Evolução do calor específico em função da temperatura e calor específico médio (adaptado de (Kuznik e Virgone, 2009)).

O valor do calor específico médio adquirido por meio do gráfico foi  $\bar{c}_p = 6636,9 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para o intervalo de temperatura  $10 \text{ °C} \div 32 \text{ °C}$ .

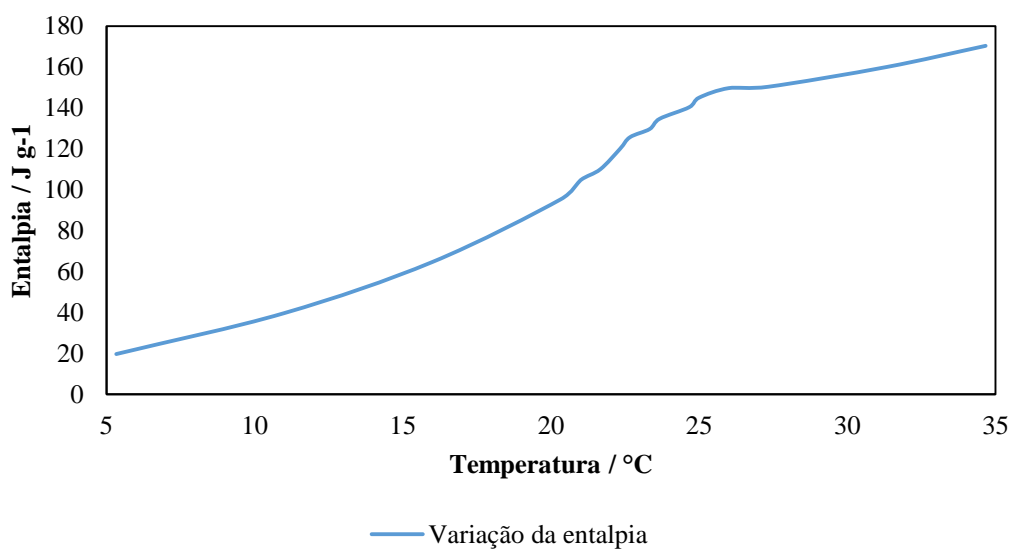


Figura 17 - Variação da entalpia em função da temperatura do compósito de PCM testado (adaptado de (Kuznik e Virgone, 2009)).

### 3.3.4 Resistência e armazenamento térmico

A parede de Trombe, supramencionada, foi idealizada seguindo os conceitos mencionados anteriormente, no subcapítulo sistema solar passivo de ganho indireto (v. Figura 18).

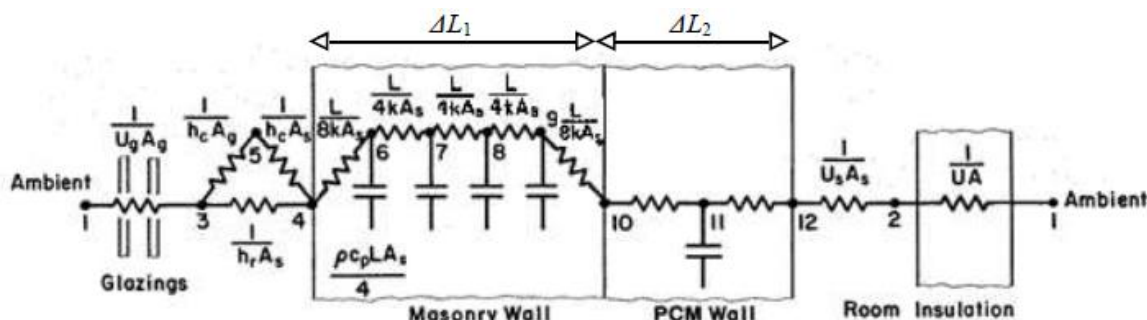


Figura 18 – Representação esquemática de uma parede de Trombe com PCM decomposta segundo as capacidades térmicas e as resistências (Samagaiaio, comunicação pessoal, adaptado de (Kosar, 1981)).

A cada elemento está associado um determinado armazenamento térmico, e os elementos estão ligados entre si por resistências. Para a simulação numérica, a parede de Trombe foi definida com uma espessura total ( $\Delta L_{TOTAL}$ ) igual a 40 cm, subdividida em duas partes:  $\Delta L_1$  (parede de alvenaria) igual a 39,35 cm e  $\Delta L_2$  (parede de PCM) igual a 2,5 cm. Na Tabela 9, apresentam-se as características específicas, previamente mencionadas, necessárias ao cálculo do armazenamento e das resistências térmicas.

Tabela 9 - Tabela síntese das propriedades dos materiais constituintes da parede de Trombe.

Características	Unidades	Valores
Armazenamento térmico por metro quadrado da área coletora, $C_{N-PCM}$	$J K^{-1} m^{-2}$	$9,20 \times 10^5$
Massa volúmica da parede de alvenaria de betão, $\rho_{N-PCM}$	$Kg m^{-3}$	2403
Calor específico do material de alvenaria de betão, $C_{P, N-PCM}$	$J kg^{-1} K^{-1}$	836
Condutibilidade térmica do material de alvenaria de betão, $C_{P, N-PCM}$	$W m^{-1} K^{-1}$	1,73
Espessura da parede de alvenaria, $\Delta L_1$	m	0,39
Calor específico do PCM, $C_{P, PCM}$	$J kg^{-1} K^{-1}$	$6,64 \times 10^3$
Condutibilidade térmica do PCM, $k, PCM$	$W m^{-1} K^{-1}$	900
Espessura da parede de PCM, $\Delta L_2$	m	$2,50 \times 10^3$
Área do coletor, $A_c$	$m^2$	50

Os valores da resistência térmica da parede de alvenaria e da parede de PCM foram adquiridos, respetivamente, pelas Equações 3.30 e Equação 3.31:

$$\frac{\Delta L_1}{8 k_{N-PCM} A_C} \text{ e } \frac{\Delta L_1}{4 k_{N-PCM} A_C} \quad (3.30)$$

$$\frac{\Delta L_2}{k_{N-PCM} A_C} \quad (3.31)$$

As Equações 3.32 e 3.33 indicam, respetivamente, o modo como se obtiveram os valores para o armazenamento térmico, tanto para a parede de alvenaria como para a parede de PCM.

$$\frac{\rho_{N-PCM} c_{P,N-PCM} \Delta L_1 A_C}{4} \quad (3.32)$$

$$\rho_{PCM} \times c_{P,PCM} \times \Delta L_2 \times A_C \quad (3.33)$$



## 4. Resultados e análise

### 4.1 Solução analítica do balanço energético

Inicialmente, foram obtidas as soluções analíticas do balanço energético, apresentado no capítulo 3 e, representativo de um sistema solar passivo de ganho direto.

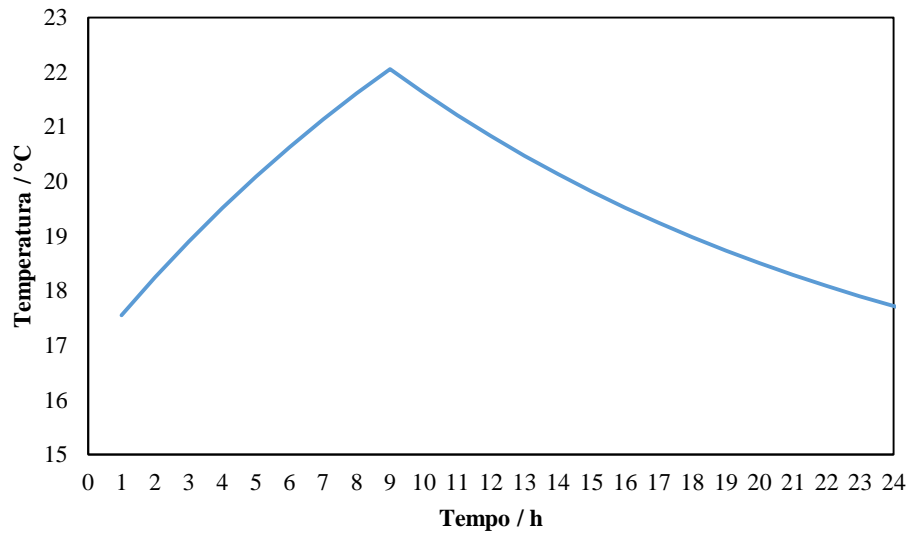


Figura 19 – Temperatura como uma função do tempo para um modelo de ganho direto.

Como já foi mencionado, a variação da temperatura interior foi obtida pela resolução das Equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$t^* = \frac{3600t}{R_{TOTAL}C} \quad (4.1)$$

$$T^* = A_1 e^{(t^*)} + 1 \quad (4.2)$$

$$T(h) = T_a + \Delta T_{ref} T^* \quad (4.3)$$

Na Figura 19 encontra-se representada a variação da temperatura interior num sistema de ganho direto em função do tempo. Assumiu-se que tanto a temperatura exterior como a insolação eram constantes,  $T_{amb} = 15 \text{ °C}$  e  $I = 250 \text{ W m}^{-1}$ , a temperatura interior foi assumida tendo em conta a gama de temperaturas que se faz sentir em Portugal. O pico da temperatura

interior, 22,05 °C, foi obtido após 9 horas do início da simulação, como se pode verificar na Figura 18.

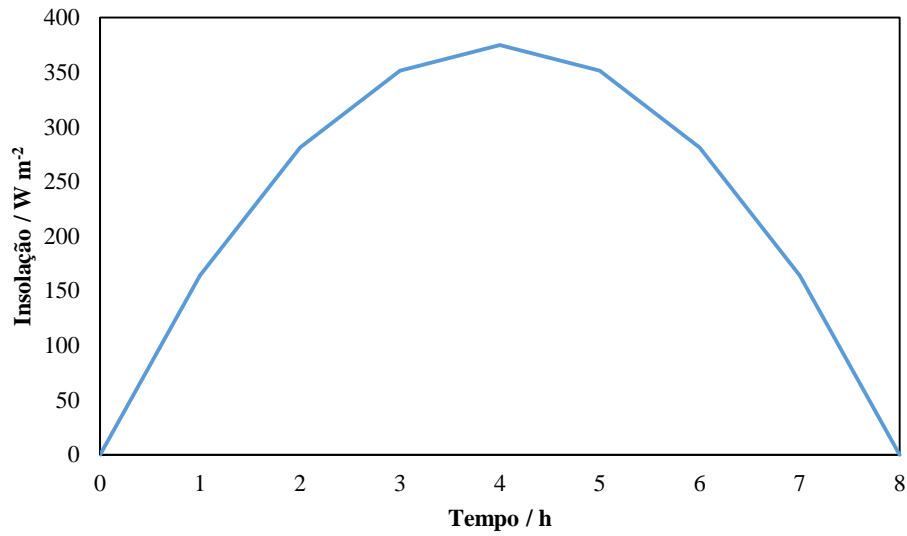


Figura 20 – Variação da insolação em função do tempo.

A variação da insolação em função do tempo obteve-se pela aplicação da Equação 4.4. O valor da insolação média ( $I_{média}$ ) mantém-se e o valor assumido para  $t_D$  foi de 8 horas.

$$I(t) = 6I_{média} \left[ \left( \frac{t}{t_D} \right) - \left( \frac{t}{t_D} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

No decorrer do período definido,  $t_D = 8$  h verifica-se que a insolação atingiu o seu pico ao fim de 4 horas, apresentando um valor de  $I(t) = 375 \text{ W m}^{-2}$ . O valor da insolação irá influenciar a variação da temperatura ambiente do interior do sistema solar passivo de ganho direto.

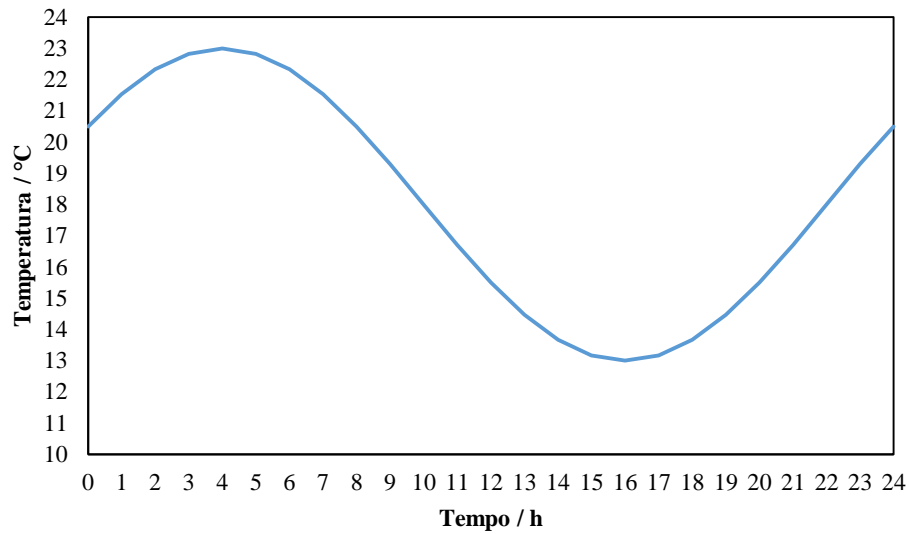


Figura 21 – Variação sinusoidal da temperatura em função do tempo.

A Equação 4.5 indica o modo como foi realizada a variação sinusoidal da temperatura em função do tempo.

$$T(t) = T_{\text{amb,média}} + \Delta T_{\text{amb}} \sin \pi \frac{t - t_{\text{temp,máx}} + 6\text{h}}{12\text{h}} \quad (4.5)$$

onde,

$$t_{\text{temp,máx}} = 4 \text{ h};$$

$$T_{\text{amb,média}} = 18 \text{ °C};$$

$$\Delta T_{\text{amb}} = 5 \text{ °C}$$

Uma vez que o pico da insolação foi alcançado ao fim de um período de 4 horas, definiu-se que o valor para  $t_{\text{temp,máx}}$  seria, também, de 4 horas. De acordo com o Decreto- Lei nº 80/2006, de 4 de abril, as condições ambientais de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20 °C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25 °C para a estação de arrefecimento (RCCTE, 2006). Por conseguinte, a  $T_{\text{amb,média}}$  foi estabelecida de modo a abranger o intervalo de conforto térmico determinado pelo RCCTE. Para o intervalo de 24 horas, a temperatura máxima foi alcançada ao fim de 4 horas com um valor de  $T_{\text{máx}} = 23 \text{ °C}$ .



## 4.2 Simulação numérica do balanço energético

A simulação numérica consistiu na criação de modelos, os quais permitiram a resolução de equações diferenciais representativas dos fenômenos de transferência de calor referidos no balanço energético. A Figura 22 apresenta o esquema do primeiro modelo de simulação criado. Nesta primeira simulação foram introduzidas as seguintes constantes:

Tabela 10 – Valores das variáveis introduzidas no primeiro modelo de simulação.

Variáveis	Unidades	Valores
$t_D$	h	8
$I(t)$	W m <sup>-2</sup>	250
$\eta_0$	-	0,90
$A_c$	m <sup>2</sup>	250
$U_c$	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	6,25
$(UA)_{eff}$	W K <sup>-1</sup>	500
$C$	J K <sup>-1</sup>	4,60×10 <sup>7</sup>
$T_{amb}$	°C	15

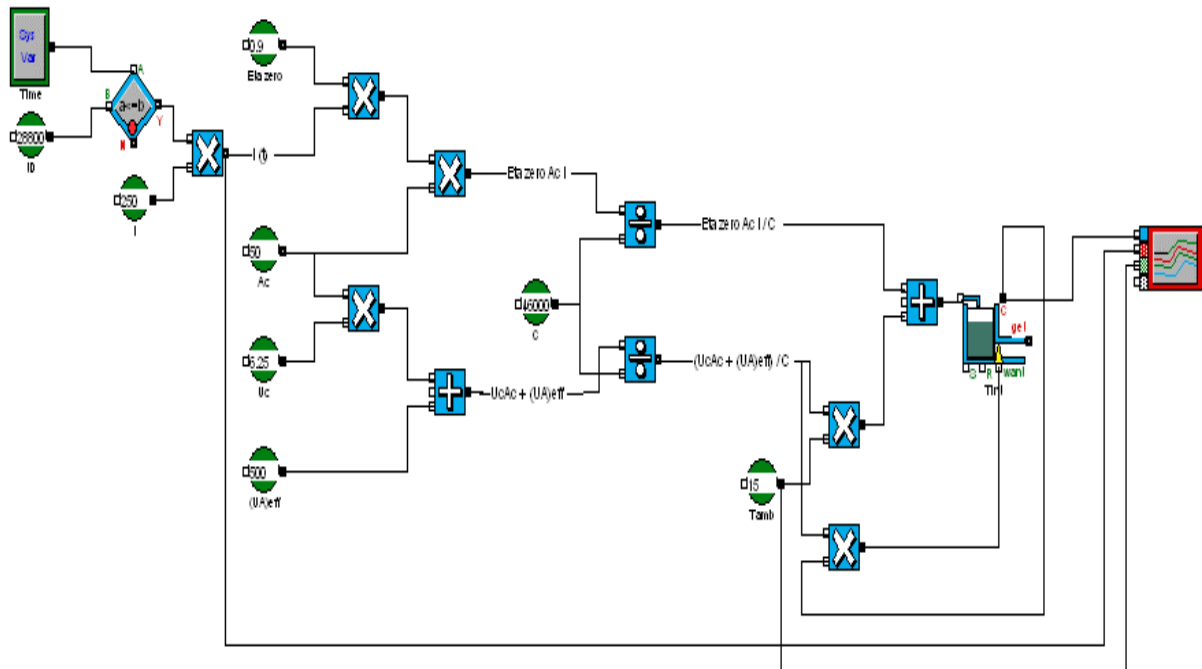


Figura 22 - Esquema do primeiro modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.

Após a introdução das constantes definidas e da elaboração da rede de simulação, obteve-se a Figura 23.

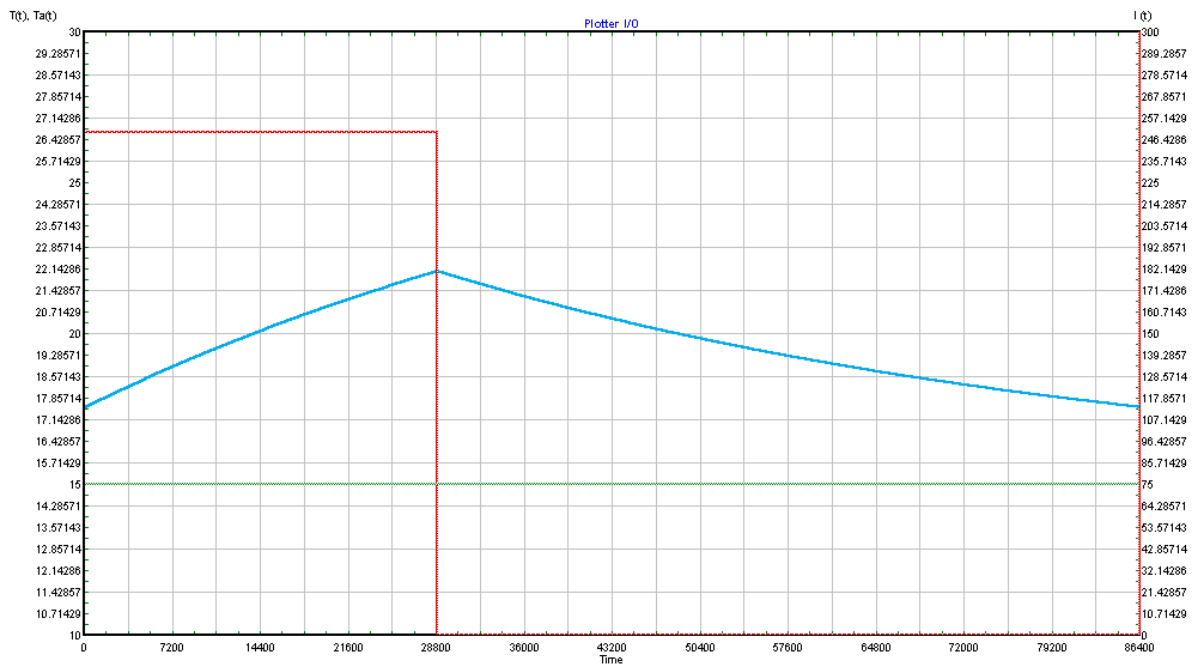


Figura 23 - Temperatura em função do tempo para um modelo de ganho direto.

A linha verde corresponde à variação da temperatura exterior, a linha azul diz respeito à variação da temperatura interior e por fim, a linha vermelha equivale à variação da insolação.

Quanto à variação da temperatura interior, esta alcançou o máximo ao fim de 8 horas, apresentando um valor de temperatura de 22,1 °C. O valor mínimo para a temperatura interior foi de 17,5 °C, verifica-se uma diferença de 4,6 °C

Posteriormente, foi criado o segundo modelo de simulação numérica, no qual foram introduzidos os mesmos pressupostos assumidos para o modelo anterior. No entanto, foi acrescentada ao modelo a Equação 4.4.

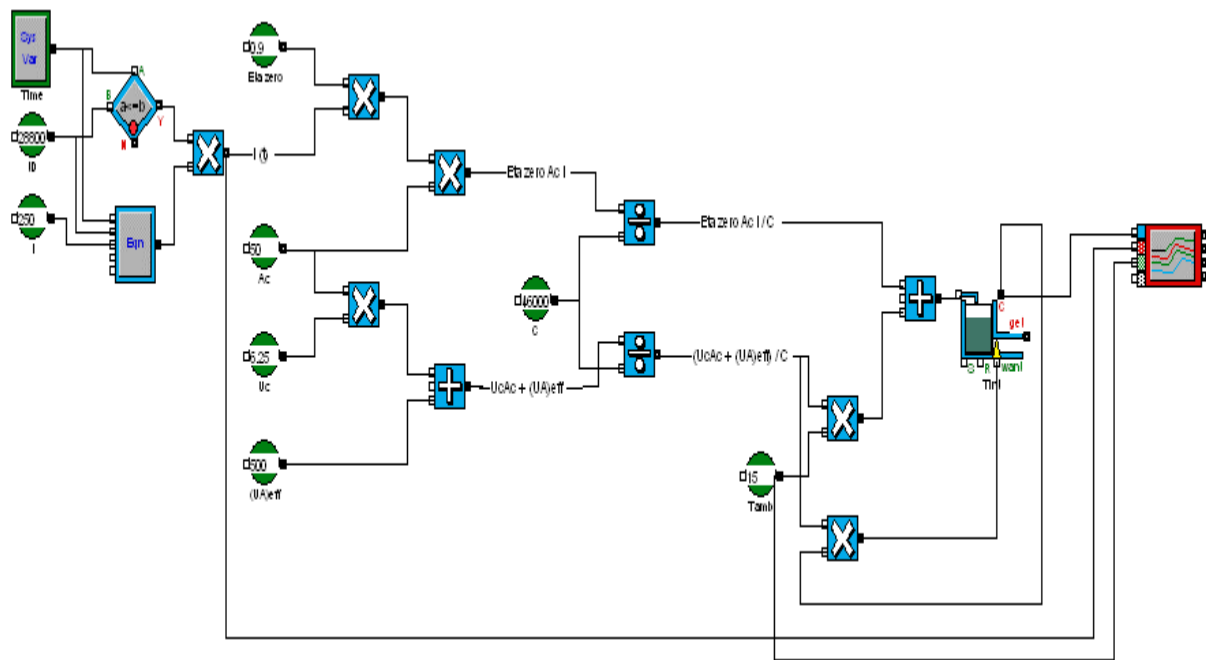


Figura 24 - Esquema do segundo modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.

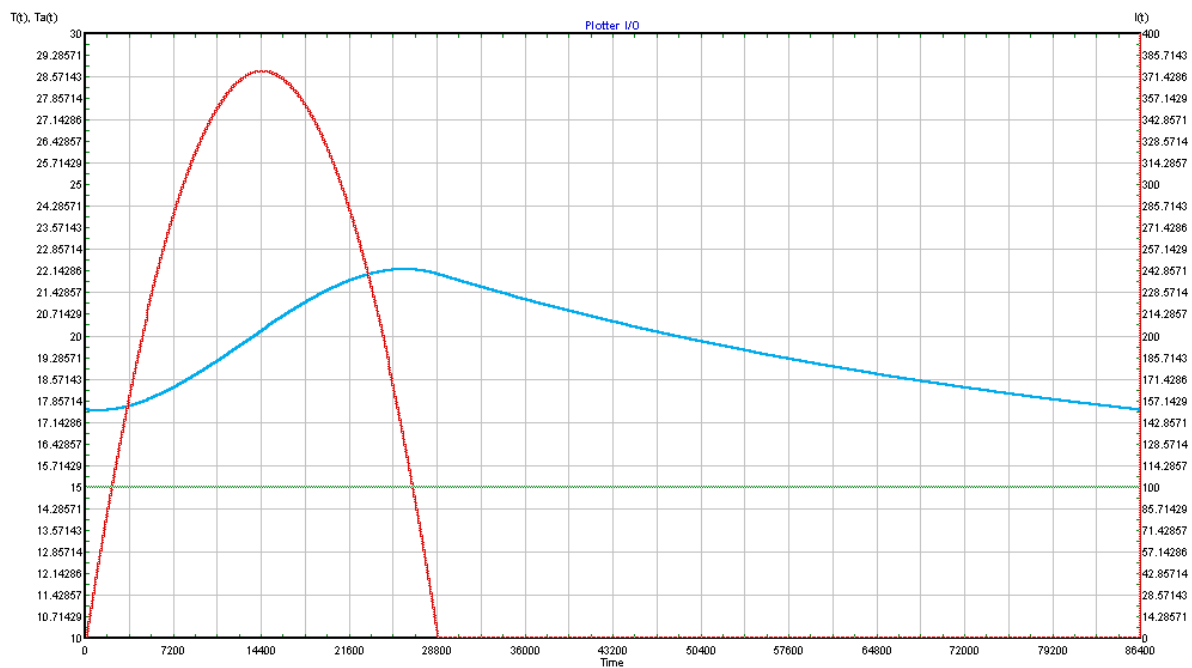


Figura 25 - Variação sinusoidal da temperatura interior e variação da insolação em função do tempo.

Quanto à variação da insolação, os resultados são idênticos aos obtidos no subcapítulo “Solução analítica do balanço energético”, após 4 horas  $I(t) = 375 \text{ W m}^{-2}$ . Relativamente à temperatura interior esta sofreu um ligeiro aumento após a imposição da variação da insolação. Observa-se que o pico foi atingido ao fim de, sensivelmente, 6 h e apresenta um valor de  $22,2^\circ\text{C}$ , quanto ao valor mínimo da temperatura interior foi de  $17,5^\circ\text{C}$ . Comparativamente com a Figura 23, a temperatura interior sofreu uma variação de  $4,7^\circ\text{C}$ .

O terceiro modelo de simulação numérica mantém tanto as constantes, como a equação inserida no modelo anterior e procede-se à incorporação da Equação 4.4.

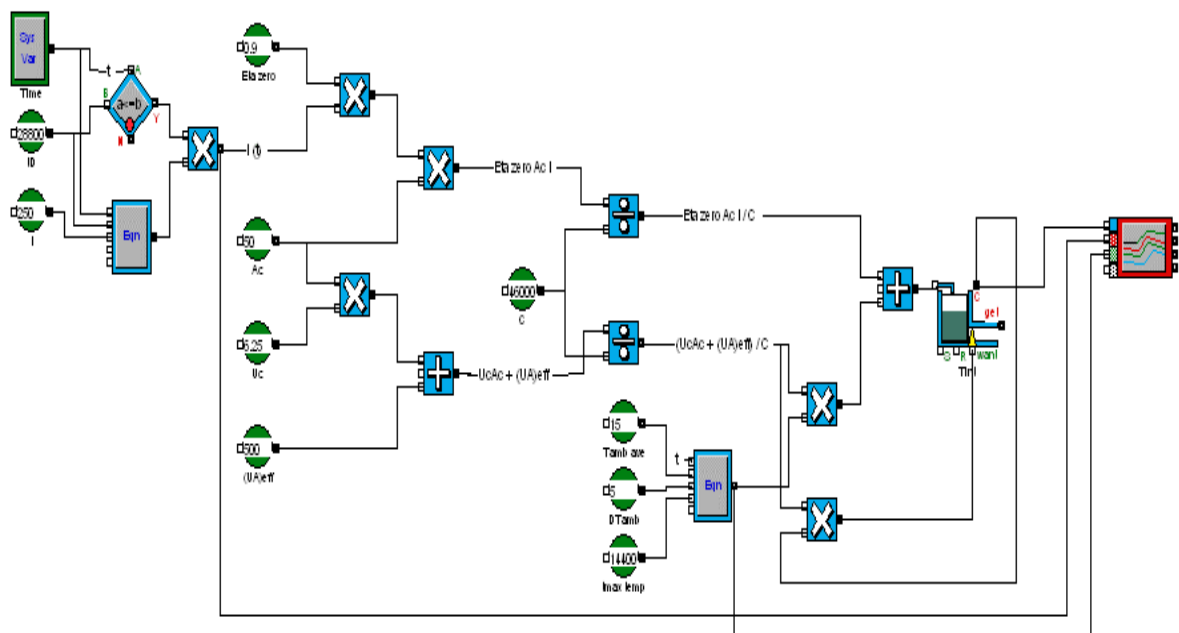


Figura 26 - Esquema do terceiro modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.

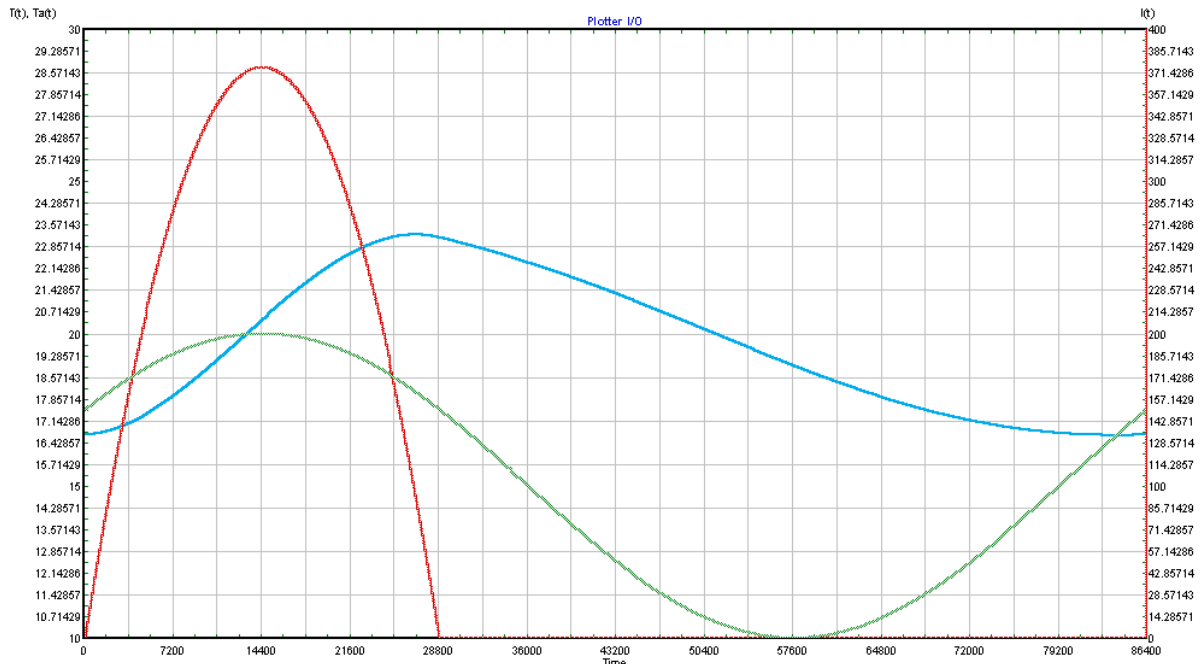


Figura 27 - Variação sinusoidal da temperatura interior em função do tempo e variação da insolação e da temperatura exterior em função do tempo.

A Figura 27 exhibe a variação da insolação, da temperatura exterior e da temperatura interior. O resultado para a variação da insolação mantém-se igual ao resultado averiguado no segundo modelo da simulação. Quanto à variação da temperatura exterior, foi-lhe imposta no último modelo a Equação 4.4 de modo a verificar qual a tendência da linha. Por conseguinte, a temperatura exterior apresenta um máximo,  $T_{\text{exterior}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , após 4 horas e um mínimo,  $T_{\text{exterior}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao fim de 16 horas. Por último, a temperatura interior admite, novamente, uma elevação da temperatura,  $23,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , e quanto à temperatura interior mínima sofreu uma diminuição,  $17,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . O aumento da temperatura interior deve-se à variação da temperatura exterior que foi imposta ao modelo em questão pela Equação 4.5.

Por fim, o quarto modelo segue a tipologia dos restantes. Contudo, o valor da capacidade térmica adota valores variáveis, sendo até ao momento um valor constante.

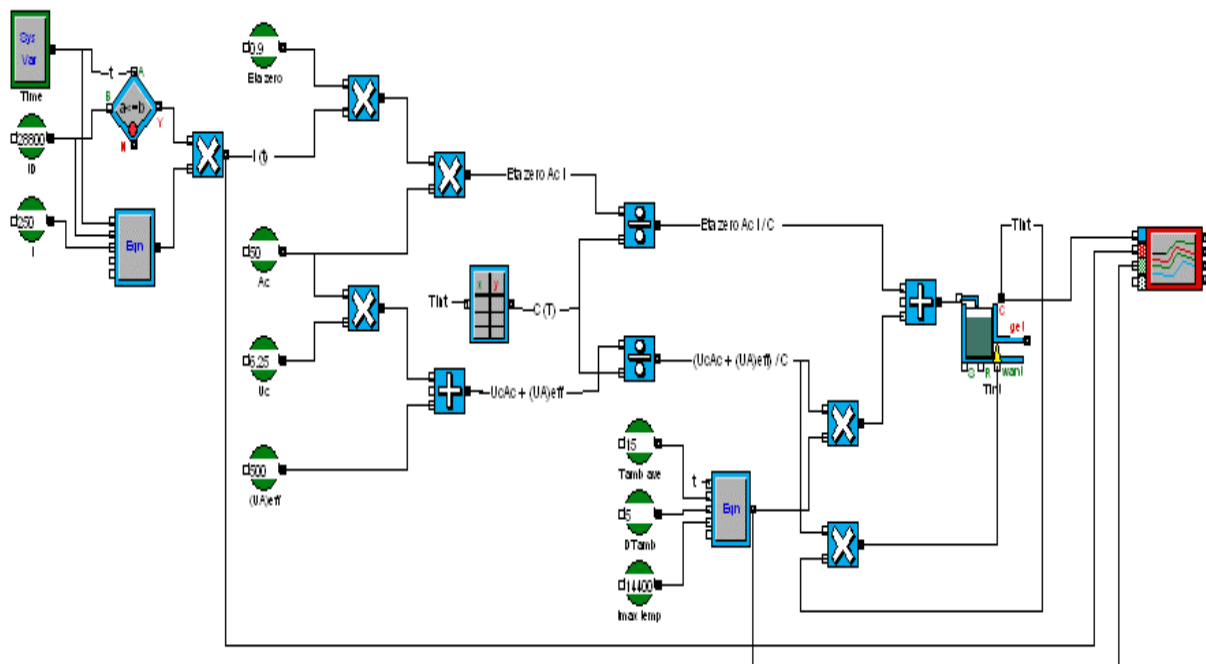


Figura 28 - Esquema do quarto modelo de simulação numérica no programa EXTEND™.

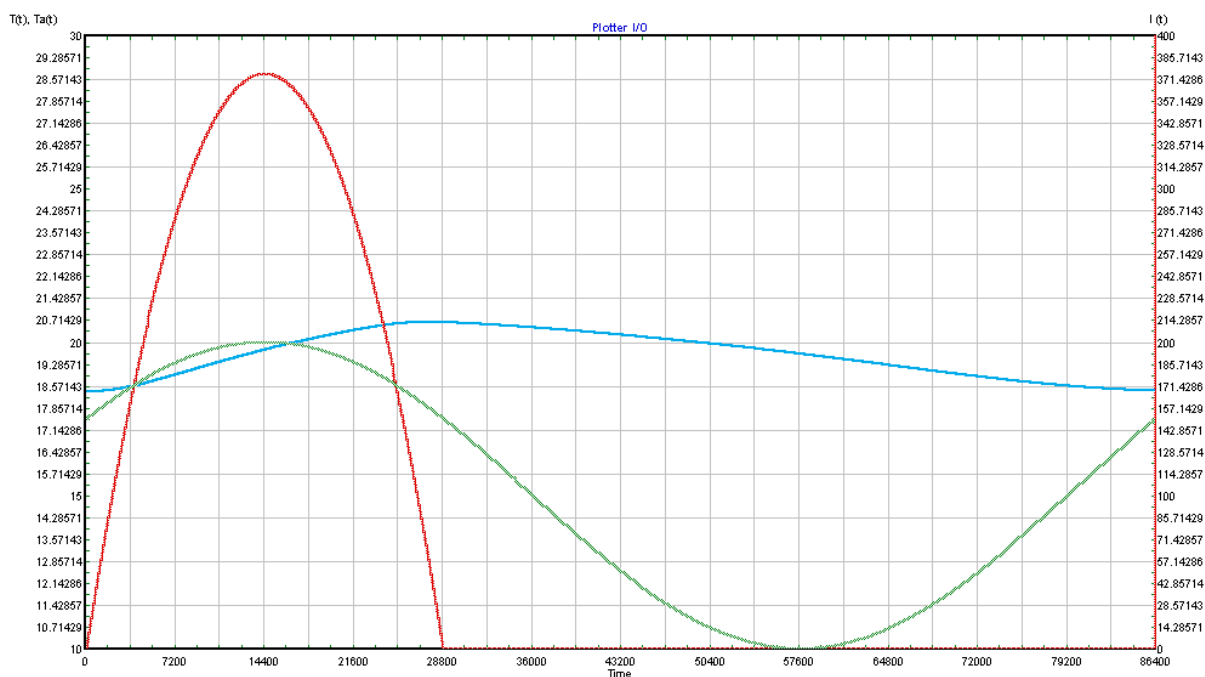


Figura 29 - Variação sinusoidal da temperatura interior, variação da insolação e variação da temperatura exterior, com aplicação de materiais de mudança de fase.

Perante esta última alteração, verifica-se que as componentes relativas à insolação e à temperatura exterior se mantêm uma vez que, não sofreram alterações no modelo. Quanto à

temperatura interior, o pico diminui, substancialmente, ao fim de 8 horas, a linha da temperatura adquire uma tendência quase constante. A temperatura interior assume um valor máximo de 20,7 °C e um valor mínimo de 18,4 °C. Verifica-se uma variação de temperatura de 2,2 °C. Este fato deve-se à adição de massa térmica aplicada ao modelo de simulação.

### 4.3 Valores da espessura dos materiais

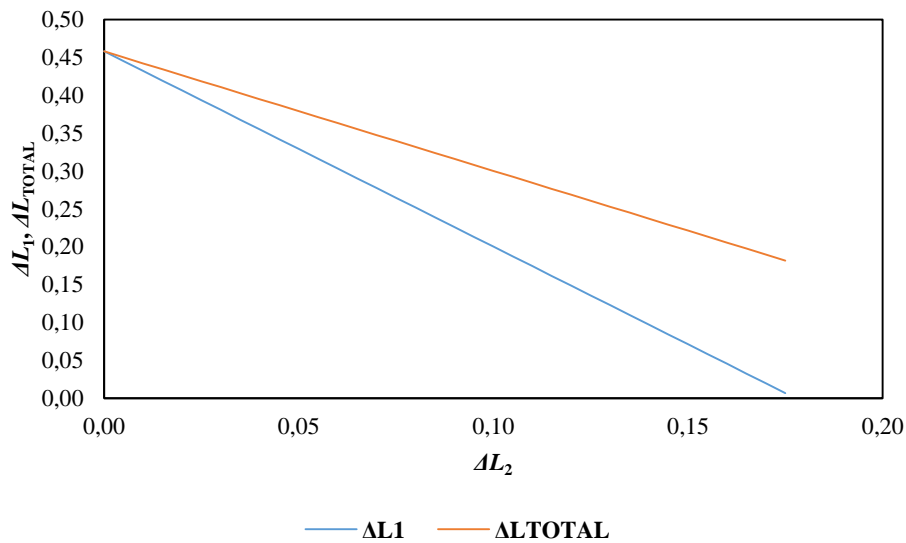


Figura 30 – Variação da espessura do material de alvenaria e variação da espessura total da parede em função da espessura do material de mudança de fase.

Pela observação da Figura 30, constata-se que quanto maior for a espessura da parede com a aplicação dos materiais de mudança de fase,  $\Delta L_2$ , menor será a espessura necessária para a parede de alvenaria,  $\Delta L_1$ . O mesmo se verifica quando comparada a espessura total da parede,  $\Delta L_{TOTAL}$ , com a espessura dos materiais de mudança de fase.

Comparativamente com os materiais de construção convencional, os PCM permitem armazenar uma maior quantidade de energia para a mesma proporção de material tradicional. Isto ocorre devido às próprias características dos PCM. Enquanto que os materiais convencionais efetuam armazenamento térmico por calor sensível, mantendo as características físicas inalteráveis, os PCM têm a faculdade em alterar de fase. No entanto, os materiais convencionais interferem na variação da temperatura do meio interior e os materiais de mudança de fase mantêm essa temperatura, aproximadamente, constante.

#### 4.4 Valores do calor específico

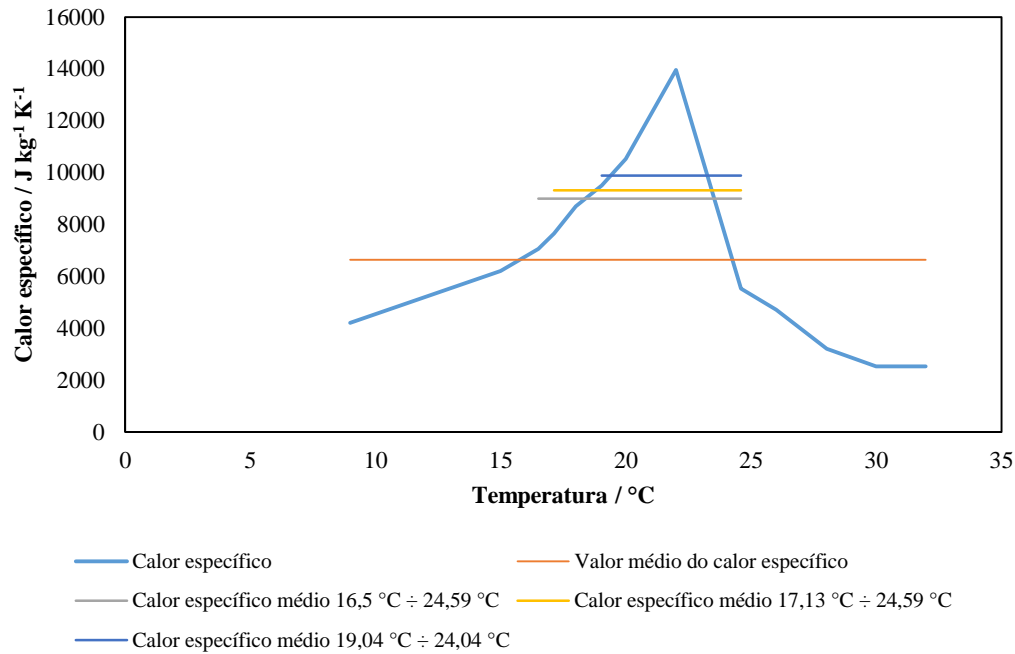


Figura 31 – Variação do calor específico, calor específico médio para o intervalo 9 °C ÷ 32 °C e calor específico médio para diferentes intervalos de temperatura.

O valor do calor específico médio foi determinado a partir de dados obtidos para um compósito de PCM. Foi estudada a incorporação de PCM microencapsulado em placas de gesso cartonado, como foi referido no capítulo interior.

Seguidamente, foi realizada a análise do calor específico médio para diferentes intervalos de temperatura. Os intervalos selecionados foram: 16,5 °C ÷ 24,6 °C, 17,1 °C ÷ 24,6 °C e 19,0 °C ÷ 24,0 °C. Analisando a Figura 31, constata-se que o intervalo de temperatura de 19,0 °C ÷ 24,0 °C apresenta o maior valor médio para o calor específico.

Após a determinação do calor específico médio,  $\bar{c}_p$ , calculou-se o valor do armazenamento térmico. A expressão adequada para o cálculo do mesmo seria a Equação 4.5.

$$C = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \text{ J K}^{-1} \quad (4.5)$$



No entanto, foi adotada a regra dos trapézios para o cálculo do integral. A regra dos trapézios consiste num método numérico para resolver uma equação diferencial ordinária. O integral acima indicado foi, portanto, ajustado para a aplicação da regra dos trapézios.

$$C = c_p(T_2) + c_p(T_1) \frac{(T_2 - T_1)}{2} \text{ J K}^{-1} \quad (4.6)$$

Tabela 11 – Intervalos de temperatura e, respetivos, valores do armazenamento térmico.

Intervalo de temperaturas	Armazenamento térmico
$T / ^\circ\text{C}$	$C / \text{J K}^{-1}$
16,5 ÷ 24,6	50,9×10 <sup>3</sup>
17,1 ÷ 24,6	49,2×10 <sup>3</sup>
19,1 ÷ 24,0	41,7×10 <sup>3</sup>

O intervalo 16,5 °C ÷ 24,6 °C é o que apresenta o maior armazenamento térmico dado que, é o intervalo que abrange uma maior gama de temperaturas. Segue-se o intervalo 17,1 °C ÷ 24,6 °C e por último, o intervalo 19,0 °C ÷ 24,0 °C.

#### 4.5 Valores da resistência e armazenamento térmico

Na estação de aquecimento é importante maximizar os ganhos solares térmicos, nesta perspetiva tira-se proveito da grande percentagem da área de envidraçado que antecede a parede de Trombe, uma vez que possibilita a obtenção de ganhos solares úteis, e simultaneamente, carregar o sistema de armazenamento de energia solar térmica. À medida que a superfície interior da área fica exposta à radiação solar, proporciona a mudança de fase de sólido a líquido do PCM e armazena calor latente. Durante a noite, as baixas temperaturas vão promover a mudança de fase de líquido a sólido, sendo a energia calorífica cedida ao interior.

No subcapítulo “Resistência e armazenamento térmico” foi apresentada uma parede de Trombe à qual correspondiam diferentes espessuras para a componente de alvenaria e a componente de PCM. A parede de Trombe foi, então, sujeita à avaliação relativamente à resistência térmica e ao armazenamento térmico. Os valores obtidos nas Tabelas 12, 13 e 14

foram calculados segundo as Equações 3.30, 3.31, 3.32 e 3.33, mencionadas no subcapítulo “Resistência e armazenamento térmico”.

Tabela 12 – Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe.

Material da parede	Espessura / m	Resistência térmica / $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	Armazenamento térmico / $\text{J K}^{-1}$
Alvenaria de betão	$4,92 \times 10^{-2}$	$5,69 \times 10^{-2}$	$9,88 \times 10^6$
	$9,84 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-3}$	
	$9,84 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-3}$	
	$9,84 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-3}$	
	$4,92 \times 10^{-2}$	$5,69 \times 10^{-2}$	
PCM	$2,50 \times 10^{-2}$	$2,83 \times 10^{-3}$	$6,47 \times 10^6$

Na Tabela 12, são citados os resultados da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe. A espessura das diferentes componentes, alvenaria e PCM, adquiriram os valores mencionados no subcapítulo “Determinação da espessura dos materiais”, isto é,  $\Delta L_1 = \Delta L_{\text{alvenaria}} = 0,39 \text{ m}$  e  $\Delta L_2 = \Delta L_{\text{PCM}} = 0,03 \text{ m}$ .

O armazenamento térmico referente à parede de alvenaria assume um valor muito superior em relação ao valor do armazenamento térmico da parede de PCM.

Posteriormente foram testados dois casos: no caso nº1 a espessura total da parede apresenta unicamente material de alvenaria,  $\Delta L_1 = \Delta L_{\text{alvenaria}} = 0,46 \text{ m}$ . No caso nº2,  $\Delta L_1 = \Delta L_{\text{alvenaria}} = 0,37 \text{ m}$  e  $\Delta L_2 = \Delta L_{\text{PCM}} = 0,04 \text{ m}$

Tabela 13 - Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe para o caso nº1.

Material da parede	Espessura / m	Resistência / $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	Armazenamento / $\text{J K}^{-1}$
Alvenaria de betão	$5,72 \times 10^{-2}$	$6,62 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^7$
	$1,14 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-3}$	
	$1,14 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-3}$	
	$1,14 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-3}$	
	$5,72 \times 10^{-2}$	$6,62 \times 10^{-4}$	
PCM	0	0	0

Tabela 14 - Valores da espessura, resistência térmica e armazenamento térmico da parede de Trombe para o caso nº2.

Material da parede	Espessura / m	Resistência / $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	Armazenamento / $\text{J K}^{-1}$
Alvenaria de betão	$4,60 \times 10^{-2}$	$5,31 \times 10^{-4}$	$9,23 \times 10^6$
	$9,19 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-3}$	
	$9,19 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-3}$	
	$9,19 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-3}$	
	$4,60 \times 10^{-2}$	$5,31 \times 10^{-4}$	
PCM	$3,50 \times 10^{-2}$	$1,67 \times 10^{-3}$	$9,06 \times 10^6$

No caso nº1, o armazenamento térmico apresenta um valor de  $1,15 \times 10^7 \text{ J K}^{-1}$ . Relativamente ao caso nº2, constata-se que os valores do armazenamento térmico dos diferentes materiais sofrem uma ligeira aproximação, apesar das diferenças entre a espessura serem notórias. O valor do armazenamento térmico para a parede de alvenaria assume um valor de  $9,23 \times 10^6 \text{ J K}^{-1}$  e a parede de PCM de  $9,06 \times 10^6 \text{ J K}^{-1}$ . Portanto, verifica-se que a aplicação dos materiais de mudança de fase influência, de modo notório, a capacidade de armazenamento térmico numa determinada área.

Por último, foi calculado o armazenamento térmico para uma determinada espessura de PCM. A partir do valor de armazenamento térmico obtido, determinou-se a espessura do material de alvenaria de betão necessário para obter o mesmo armazenamento térmico. Portanto, para armazenar  $9,60 \times 10^6 \text{ J K}^{-1}$  são necessários 0,04 m de PCM e 0,36 m de material de alvenaria.

Tabela 15 - Valores da espessura e do armazenamento térmico para os diferentes casos de estudo.

Caso nº	$\Delta L_{\text{ALVENARIA DE BETÃO}} / \text{m}$	$\Delta L_{\text{PCM}} / \text{m}$	$C_{\text{ALVENARIA DE BETÃO}} / \text{J K}^{-1}$	$C_{\text{PCM}} / \text{J K}^{-1}$
1	0,39	0,03	$9,88 \times 10^6$	$6,47 \times 10^6$
2	0,46	0,0	$1,15 \times 10^7$	0
3	0,37	0,04	$9,23 \times 10^6$	$9,06 \times 10^6$
4	0,36	0,03	$9,60 \times 10^6$	$9,60 \times 10^6$

## 5. Conclusões

Após a realização do estudo e analisados os respectivos resultados, passa-se à apresentação das principais conclusões. Pode-se afirmar que os objetivos estabelecidos para a dissertação foram cumpridos de modo geral.

O trabalho apresentado evidencia o potencial dos modelos de simulação para o estudo do comportamento térmico de edifícios que utilizam tecnologias solares passivas. Quanto à simulação numérica efetuada pelo programa EXTEND™, verificou-se que tanto o pico da temperatura da parede interior como a amplitude térmica baixaram, em valor absoluto e valor relativo, contribuindo para um ambiente mais cómodo e próximo do valor da temperatura de conforto. O modelo apresentado, apesar de recorrer a uma insolação que não é realista, sugere uma eficiente aproximação da realidade. O sistema pode tornar-se ligeiramente mais realista se forem tidos em conta critérios como a ventilação e o isolamento do edifício.

Do ponto de vista térmico os PCM devem apresentar um intervalo de temperatura de mudança de fase adequado à temperatura operacional expectável para o interior dos edifícios, que se aproxima das temperaturas de conforto: 20 °C para a estação de aquecimento e 25 °C para a estação de arrefecimento. De acordo com os resultados obtidos para o calor específico (v. Figura 31), o intervalo de temperatura que melhor reflete o comportamento do compósito de PCM analisado é o intervalo 19,0 °C ÷ 24,0 °C,  $c_P = 9880 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . E o intervalo 16,5 °C ÷ 24,6 °C corresponde ao intervalo que apresenta maior armazenamento térmico,  $C = 50,9 \times 10^3 \text{ J K}^{-1}$ . Verifica-se que o aumento da temperatura contribui evidentemente para o aumento do calor específico e que ocorre armazenamento térmico quando a temperatura do material se eleva 1 °C, traduzindo a tendência de um material construtivo para o armazenamento de calor. Para além disso, o composto em estudo apresenta gamas de temperatura de funcionamento de acordo com a gama de temperatura de conforto sugerida para os edifícios.

Por último, conclui-se que os materiais de mudança de fase têm um papel relevante no que se refere ao armazenamento térmico. A partir do estudo realizado no subcapítulo “Valores da resistência e armazenamento térmico”, confirma-se que uma pequena quantidade de material de mudança de fase armazena elevados valores de energia térmica.



## Bibliografia

- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., & Quenard, D. (2006). Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings*, 38(4), 357–366.
- Alawadhi, E. M. (2008). Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*, 40(3), 351–357.
- Athienitis, a K., & Chen, Y. (2000). The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. *Solar Energy*, 69(3), 229–237.
- Azenha, M. (2004). Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica, 220. Retrieved from <http://www.civil.uminho.pt/mazinha/Miguel>  
Azenha - Comportamento do betao nas primeiras idades - Dissertacao de mestrado.
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368.
- Balcomb, J. D., & Mcfarland, R. D. (1978). Of a passive solar heated building of the thermal storage.
- Bell, G. E. (1982). On the performance of the enthalpy method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(4), 587–589.
- Boh, B., Knez, E., & Sumiga, B. (2008). Microencapsulation of phase change materials by in situ polymerisation, P08, 11p.
- Borreguero, A. M., Luz Sánchez, M., Valverde, J. L., Carmona, M., & Rodríguez, J. F. (2011). Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy*, 88(3), 930–937.
- Buddhi, D., & Bansal, N. K. (1988). Solar thermal storage systems using phase change materials. *International Journal Of Energy Research* 12: , 12(May 1987), 547–555.
- Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39(2), 113–119.
- Canas, I., & Martín, S. (2004). Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. *Building and Environment*, 39, 1477–1495.
- Cerón, I., Neila, J., & Khayet, M. (2011). Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*, 43(8), 1869–1874.
- Chandra, S., Kumar, R., Kaushik, S., & Kaul, S. (1985). Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCCM thermal storage wall. *Energy Conversion and Management*, 25(1), 15–20.

- Chen, B., & Chen, C. (2006). Experimental investigation of natural convection in trombe wall systems school of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, (1995), 7–11.
- Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., & Wang, C. (2008). A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings*, 40(5), 882–890.
- Costa, M., Buddhi, D., & Oliva, a. (1998). Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction. *Energy Conversion and Management*, 39(3-4), 319–330.
- Darkwa, K., & O’Callaghan, P. W. (2006). Simulation of phase change drywalls in a passive solar building. *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 853–858.
- Demirbas, M. F. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: An Overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 85–95.
- DGEG. (2013). Relatório do Estado do Ambiente 2013.
- Dieckmann, D. J. H. (2012). Latent heat storage in concrete.
- Drolen, B. L. (1979). *Thermal performance of passive solar heating systems*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Evers, A. C., Medina, M. a., & Fang, Y. (2010). Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator. *Building and Environment*, 45(8), 1762–1768.
- Feldman, D., Banu, D., & Hawes, D. W. (1995). Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(2), 147–157.
- Fernández-González, A. (2007). Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest. *Solar Energy*, 81, 581–593.
- García, E., de Pablos, a., Bengoechea, M. a., Guaita, L., Osendi, M. I., & Miranzo, P. (2011). Thermal conductivity studies on ceramic floor tiles. *Ceramics International*, 37(1), 369–375.
- Gonçalves, H., & Cabrito, P. (2005). Edifício Solar XXI: : Um edifício energeticamente eficiente em Portugal, 6.
- Gu, E., Mehling, H., Hiebler, S., & Cabeza, L. F. (2008). Determination of the enthalpy of PCM as a function of temperature using a heat-flux DSC — A study of different measurement procedures and their accuracy, (April), 1258–1265.
- Hadorn, J.-C. (2004). Storage solutions for solar thermal energy, 1–21.

- Haglund, B., & Rathmann, K. (1996). Thermal mass in passive solar and energy-conserving buildings. *Vital Signs Curriculum Materials Project, Center*.
- Hasan, A. (1994). Phase change material energy storage system employing palmitic acid. *Solar Energy*, 52(2), 143–154.
- Hasnain S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138.
- Hawes, D. W., Feldman, D., & Banu, D. (1993). Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings*, 20(1), 77–86.
- Hittle, D. C. (2002). Phase change materials in floor tiles for thermal energy storage, (August), 0–41.
- Ho, C. J., & Chu, C. H. (1996). Numerical simulation of heat penetration through a vertical rectangular phase change material/air composite cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(9), 1785–1795.
- Holtz, M. J., Robbins, C. L., Frey, D. J., Wortman, D. N., Oatman, P. A., Gregerson, J. M., Ashleigh, T. (1989). *Solar Handbook Passive: Introduction To Passive Solar Concepts, I*.
- Jor., O. C. (2002). Directiva 2002/91/CE. *Jornal Oficial Das Comunidades Europeias*, (11), 65–71.
- Khodadadi, J. M., & Zhang, Y. (2001). Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(8),
- Khudhair, A. M., & Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263–275.
- Knowles, T. R. (1981). Proportioning composities for efficient thermal storage walls. *Solar Energy*, 31(3).
- Kosar, D. R. (1981). Performance prediction of passive solar heating sytems.
- Kosny, J. (2008). 2006/07 Field Testing of Cellulose Fiber Insulation Enhanced with Phase Change Material, (September).
- Kosny, J., Miller, W., Syed, A. M., & Ph, D. (2007). Field Testing of Second-Generation Residential Attic Using Inorganic PCM Thermal Storage, (August).
- Kośny, J., Ph, D., Yarbrough, D., Ph, D. P. E., Miller, W., Petrie, T., Leuthold, D. (n.d.). PCM-Enhanced Building Envelopes in Current ORNL Research Projects.



- Kosny, J., Yarbrough, D. W., Wilkes, K., Leuthold, D., & Syad, a. (2006). PCM-Enhanced Cellulose Insulation - Thermal Mass in Lightweight Natural Fibres. *2006 ECOSTOCK Conference IEA, DOE, Richard Stockton College of New Jersey, June 2006*.
- Kuznik, F., & Virgone, J. (2009). Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings*, *41*(5), 561–570.
- Kuznik, F., Virgone, J., & Noel, J. (2008). Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*, *28*(11-12), 1291–1298.
- L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. P. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*, 394–398.
- Liu, S., Li, Y., & Zhang, Y. (2014). Mathematical solutions and numerical models employed for the investigations of PCMs' phase transformations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *33*, 659–674.
- Mendonça, P. (2005). *Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*. Universidade do Minho.
- Micronal ® PCM Gypsum Wallboards Phase Change, M. (n.d.). Micronal ® PCM Gypsum Wallboards Phase Change Materials :
- Nayak, J. K., Bansal, N. K., & Sodha, M. S. (1983). Analysis of passive heating concepts. *Solar Energy*, *30*(I), 51–69.
- RCCTE. (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.o 80/2006. *Diário Da República*, *46*(2468–2513).
- Romero, M. A. B. (2000). Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano, 66.
- Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 6340–6351.
- Scalat, S., Banu, D., Hawes, D., Parish, J., Haghighata, F., & Feldman, D. (1996). Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *44*(1), 49–61.
- Schmidt, M., & Division, F. P. (2007). Phase Change Materials – latent heat storage for interior climate control. *Construction*, 0–25.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(2), 318–345.

- Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z., & Li, D. (2007). Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. *Energy and Buildings*, 39(10), 1088–1091.
- Sunke, N., & Schultmann, F. (2009). *Lifecycle Design of Buildings, Systems and Materials. CIB W115 Construction Material Stewardship*.
- Sunliang, C. (2010). State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings.
- Telkes, M. (1983). Applications for heating and cooling in buildings.
- Vaz, A. M. (2012). SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase.
- Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C., & Schwarzer, K. (1999). Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System. *Solar Energy*, 65(3), 171–180.
- Yinping, Z., Yi, J., & Yi, J. (1999). A simple method, the -history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology*, 10(3), 201–205.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering* (Vol. 23).
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2004). Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 27(8), 839–849.
- Zhang, Y., Lin, K., Jiang, Y., & Zhou, G. (2008). Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. *Energy and Buildings*, 40, 1771–1779.
- Zhao, C. Y., & Zhang, G. H. (2011). Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3813–3832.